21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

电力系统继电保护

（第2版）

主　编　马永翔

- 内容上突出微机保护等新知识，体现新颖性
- 形式上丰富教学目标等新构架，体现可读性
- 习题更注重工程实际内容应用，体现实用性







说　明

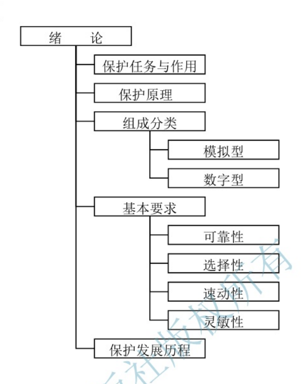
本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要全本教材浏览或需要本书课件等相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



第1章　绪　　论

【本章知识结构图】



随着社会的发展，人们对电的需要愈加依赖，为了满足人们安全、可靠的用电需求，电力网络中装设有大量的继电保护装置，这些装置被喻为电力系统的无声卫士，时刻监控者设备的运行状况，如果设备一旦有不正常、故障情况，它们即刻发出报警信号或跳闸命令。这些装置如何协调工作，通过本章的学习，将会得到初步解答。

【本章教学目标与要求】

熟悉继电保护的任务、作用及基本原理；

掌握继电保护的组成、分类及要求；

理解继电保护工作的特点；

了解继电保护的发展历程。



本章导图　某750kV变电站GIS配电装置图

1.1 电力系统继电保护的任务和作用

电力系统在运行中可能发生各种故障和不正常运行状态，最常见同时也最危险的故障是各种类型的短路。发生短路时可能产生以下后果：

（1）数值较大的短路电流通过故障点时，产生电弧，使故障设备损坏或烧毁；

(2) 短路电流通过非故障元件时，使电气设备的载流部分和绝缘材料的温度超过散热条件的允许值而不断升高，造成载流导体熔断或加速绝缘老化和损坏，从而可能发展成为故障；

(3) 电力系统中部分地区的电压大大下降 ，破坏用户工作的稳定性或影响产品的质量；

（4）破坏电力系统中各发电厂并列运行的稳定性，引起系统振荡，从而使事故扩大，甚至导致整个系统瓦解。

各种类型的短路包括三相短路、两相短路、两相短路接地和单相接地短路。不同类型短路发生的概率是不同的，不同类型短路电流的大小也不同，一般为额定电流的几倍到几十倍。大量的现场统计数据表明，在高压电网中，单相接地短路次数占所有短路次数的 85%以上，2002 年我国 220kV 电网共有输电线路 3884 条，线路总长 150026km，共发生故障 1487 次，故障率为 0.99 次/（100 km · 年）。表 1-1 给出了 2002 年我国 220kV 电网输电线路各种类型故障发生的次数和百分比。

表 1-1　2002 年我国 220KV 电网输电线路故障统计表

故障类型	三相短路	两相短路	两相短路接地	单相接地短路	其它故障
故障次数	17	28	91	1319	32
故障百分比	1.14%	1.88%	6.12%	88.7%	2.16%

电力系统中电气元件的正常工作遭到破坏，但没有发生故障，这种情况属于不正常工作状态。如因负荷超过供电设备的额定值引起的电流升高，称过负荷，就是一种常见的不正常工作状态。在过负荷时，电气设备的载流部分和绝缘材料过度发热，从而使绝缘加速老化，甚至损坏，引起故障。此外，系统中出现功率缺额而引起的频率降低，发电机突然甩负荷而产生的过电压，以及电力系统发生振荡等，都属于不正常运行状态。

电力系统中发生不正常运行状态和故障时，都可能引起系统事故。事故是指系统全部或部分正常运行遭到破坏，电能质量变到不能容许的程度，以致造成对用户的停止供电或少供电，甚至造成人身伤亡和电气设备的损坏。

系统事故的发生，除了自然条件的因素（如雷击、架空线路倒杆等）外，一般都是由于设备制造上的缺陷、设计和安装的错误、检修质量不高或运行维护不当而引起的。因此，只有充分发挥人的主观能动性，正确地掌握客观规律，加强对设备的维护和检修，就可能大大减少事故发生的几率。

在电力系统中，除应采取各项积极措施消除或减少事故发生的可能性外，还应能做到设备或输电线路一旦发生故障时，应尽快地将故障设备或线路从系统中切除，保证非故障部分继续安全运行，缩小事故影响范围。

由于电力系统是一个整体，电能生产、传输、分配和使用是同时完成，各设备之间都有电或磁的联系，因此，当某一设备或线路发生短路故障时，在很短的时间就影响到整个电力系统的其它部分，为此要求切除故障设备或输电线路的时间必须很短，通常切除故障的时间小到十分之几秒到百分之几秒。显然要在这样短的时间内由运行人员及时发现并手动将故障切除是绝对不可能的。因此，只有借助于装设在每个电气设备或线路上的自动装置，即继电保护装置才能实现。这种装置到目前为止，有一部分仍然由单个继电器或继电器与其附属设备的组合构成，故称为继电保护装置。

在电子式静态保护装置和数字式保护装置出现以后，虽然继电器多已被电子元件或计算机取代，但仍沿用此名称。在电业部门常常用继电保护一词泛指继电保护技术或由各种继电保护装置组成的继电保护系统。继电保护装置一词则指各种具体的装置。

继电保护装置就是指能反应电力系统中电气元件发生故障或不正常运行状态，并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。它的基本任务是:

（1）自动、迅速、有选择性地将故障元件从电力系统中切除，使故障元件免于继续遭到破坏，保证其它无故障部分迅速恢复正常运行；

（2）反应电气元件的不正常运行状态，并根据运行维护的条件（如有无经常值班人员），而动作于信号，以便值班员及时处理，或由装置自动进行调整，或将那些继续运行就会引起损坏或发展成为事故的电气设备予以切除。此时一般不要求保护迅速动作，而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免暂短的运行波动造成不必要的动作和干扰　　而引起的误动；

（3）继电保护装置还可以与电力系统中的其它自动化装置配合，在条件允许时，采取预定措施，缩短事故停电时间，尽快恢复供电，从而提高电力系统运行的可靠性。

由此可见，继电保护在电力系统中的主要作用是通过预防事故或缩小事故范围来提高系统运行的可靠性，最大限度地保证向用户安全连续供电。因此，继电保护是电力系统的重要组成部分，是保证电力系统安全可靠运行的必不可少的技术措施之一。在现代的电力系统中，如果没有专门的继电保护装置，要想维持系统的正常运行是根本不可能的。

1.2 继电保护的基本原理

为了完成上述第一个任务，继电保护装置必须具有正确区分被保护元件是处于正常运行状态还是发生了故障，是保护区内故障还是区外故障的功能。保护装置要实现这一功能，需要根据电力系统发生故障前后电气物理量变化的特征为基础来构成。

电力系统发生故障后，工频电气量变化的主要特征是：

（1）电流增大。 短路时故障点与电源之间的电气设备和输电线路上的电流将由负荷电流增大至大大超过负荷电流；

（2）电压降低。当发生相间短路和接地短路故障时，系统各点的相间电压或相电压值下降，且越靠近短路点，电压越低；

（3）电流与电压之间的相位角改变。正常运行时电流与电压间的相位角是负荷的功率因数角，一般约为 20^0，三相短路时，电流与电压之间的相位角是由线路的阻抗角决定，一般为 60^0～85^0，而在保护反方向三相短路时，电流与电压之间的相位角则是 180^0＋（60^0～85^0）；

（4）测量阻抗发生变化。测量阻抗即测量点(变护安装处)电压与电流之比值。正常运行时，测量阻抗为负荷阻抗；金属性短路时，测量阻抗转变为线路阻抗，故障后测量阻抗显著减小，而阻抗角增大。

不对称短路时，出现相序分量，这些分量在正常运行时是不出现的。

利用短路故障时电气量的变化，便可构成各种原理的继电保护。例如，据短路故障时电流的增大，可构成过电流保护；据短路故障时电压的降低，可构成电压保护；据短路故障时电流与电压之间相角的变化，可构成功率方向保护；据电压与电流比值的变化，可构成距离保护；据故障时被保护元件两端电流相位和大小的变化，可构成差动保护；据不对称短路故障时出现的电流、电压的相序分量，可构成零序电流保护、负序电流保护和负序功率方向保护；高频保护则是利用高频通道来传递线路两端电流相位、大小和短路功率方向信号的一种保护。

此外，除了上述反应工频电气量的保护外，还有反应非工频电气量的保护，如超高压输电线路的行波保护、电力变压器的瓦斯保护及反应电动机绕组温度升高的过负荷或过热保护等。

1.3 继电保护的组成及分类

继电保护实际上是一种自动控制装置。从 20 世纪初到现在，继电保护装置经历了机电式保护装置（包括电磁型、感应型、整流型）、静态式保护装置（包括晶体管型、集成电路型）和数字式继电保护装置三大发展阶段。

机电型继电保护是由若干个不同功能的继电器所组成。继电器是一种能自动动作的电器，只有加入某种物理量（如电流或电压等），或者加入的物理量达到一定数值时，它就会动作，其常开触点闭合，常闭触点断开，输出信号。

每个继电器都由感受元件、比较元件和执行元件三个主要部分组成。感受元件用来测量控制量的变化，并以某种形式传送到比较元件；比较元件将接收的控制量与整定值进行比较，并将比较结果的信号输入执行元件；执行元件执行继电器动作输出信号的任务。

继电器按动作原理的不同分为：电磁型、感应型、整流型等；

按反应物理量的不同可分为：电流、电压、功率方向和阻抗继电器等；

按继电器在保护装置中的作用不同可分为：主继电器（如电流、电压和阻抗继电器等）和辅助继电器（如中间、时间和信号继电器等）。

有机械的可动部分和接点的继电器称为机电型继电器。由这类继电器组成的继电保护装置称为机电型继电保护。

静态继电保护装置是应用晶体管或集成电路等电子元件来实现的，它由若干个不同功能的回路，如测量、比较或比相触发、延时、逻辑和输出等回路组成。具有体积小、重量轻、功耗小、灵敏度高、动作快和不怕震动、可以实现无触点等一系列的优点。

模拟型继电保护装置的种类很多，一般而言，它们都由测量回路、逻辑回路和执行回路三个主要部分组成，其原理框图如图 1.1 所示。

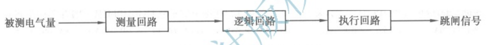


图 1.1 模拟型继电保护装置原理框图

测量回路的作用是测量与被保护电气设备或线路工作状态有关的物理量的变化的，如电流、电压等的变化，以确定电力系统是否发生了短路故障或出现不正常运行情况；逻辑部分的作用是当电力系统发生故障时，根据测量回路的输出信号，进行逻辑判断，以确定保护是否应该动作，并向执行元件发出相应的信号；执行回路的作用是执行逻辑回路的判断，发出切除故障的跳闸脉冲或指示不正常运行情况的信号。

现以最简单的过电流保护装置为例来说明继电保护的组成和基本工作原理。

图 1.2 所示为一条线路过电流保护装置的原理接线图，图中电流继电器 KA 的线圈接于被保护线路电流互感器 TA 的二次回路，这就是保护的测量回路，它监视被保护线路的运行状态，用以测量线路中电流的大小。在正常运行情况下，线路中通过最大负荷电流时，继电器不动作；当被保护线路发生短路故障时，流入继电器 KA 线圈回路的电流大于继电器的动作电流时，电流继电器立即动作，触点闭合，接通逻辑回路中时间继电器 KT 的线圈回路，时间继电器起动并经延时后触点闭合，接通执行回路中的信号继电器 KS 和断路器 QF 跳闸线圈 YR 回路，使断路器 QF 跳闸，切除故障。

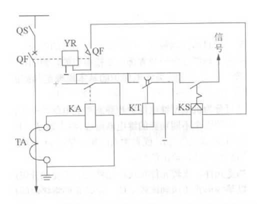


图 1.2 线路过电流保护装置单相原理接线图

数字型的计算机继电器保护是把被保护设备和线路输入的模拟电气量经模／数转换器

（A/D）变换为数字量，利用计算机进行处理和判断。计算机由硬件部分和软件部分组成，硬件部分主要采用微型计算机或微处理器来实现，计算机保护硬件部分的原理框图如图 1.3 所示。

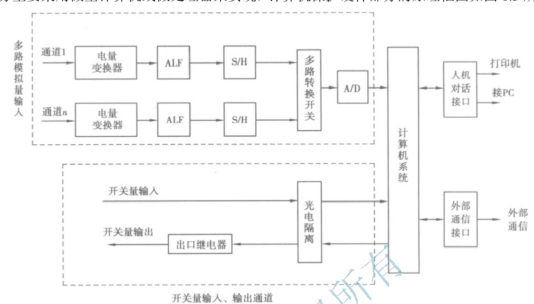


图 1.3 微机继电保护硬件部分原理框图

被保护设备或线路的交流电流、电压经电流互感器和电压互感器输入到计算机保护的输入通道。由于需要同时输入多路电压和电流（如三相电压和三相电流），因此，需要配置多路输入通道。在输入通道中，首先经变换器将电流和电压变换为适于微机保护用的低电压量（±5V~±10V），再由模拟低通滤波器滤除直流分量、低频分量和高频及各种干扰波后，进入采样保持电路（S/H）,将一个在时间上连续变化的模拟量转换为时间上的离散量，完成对输入模拟量的采样。通过多路转换开关（MPX）将多个输入电气量按输入时间前后分开，依次送到模数转换器（A/D），将模拟量转换为数字量进入计算机系统进行运算处理，判断是否发生故障，通过开关量输出通道输出，经光电隔离电路送到出口继电器，从而接通跳闸线圈，起动跳闸回路。

人机接口部分的作用是建立起微机保护与使用者之间的信息联系，以便对装置进行人工操作，调试和信息反馈。外部通信接口的作用是提供计算机局域通信网络以及远程通信网络的信息通道。

软件部分是根据保护的工作原理和动作要求编制的计算程序，不同原理的保护计算程序不同。微机保护的计算程序是根据保护工作原理的数学模型即数学表达式来编制的。这种数学模型称为计算机继电保护的算法。通过不同的算法便可以实现各种保护功能。各种类型保护的计算机硬件和外围设备可以是通用的，只要计算程序不同，就可以得到不同原理的保护，而且计算机可以根据系统运行方式的改变自动改变动作的整定值，使保护具有更大的灵活性。保护用计算机有自诊断能力，不断地检查和诊断保护本身的故障，并及时进行处理，大大地提高了保护装置的可靠性，并能实现快速动作的要求。

图 1.4 为微机型线路保护屏，图 1.5 为微机型变压器保护装置。





图 1.4 微机型线路保护屏　　　　　　　　图 1.5　微机变压器保护装置

电力系统的继电保护根据被保护对象不同，分为发电厂、变电所电气设备的继电保护和输电线路的继电保护。前者是指发电机、变压器、母线和电动机等元件的继电保护，简称为元件保护；后者是指电力网及电力系统中输电线路的继电保护 ，简称线路保护。

按作用的不同继电保护又开分为主保护、后备保护和辅助保护。主保护是指被保护元件内部发生的各种短路故障时，能满足系统稳定及设备安全要求的、有选择地切除被保护设备或线路故障的保护。后备保护是指当主保护或断路器拒绝动作时，用以将故障切除的保护。后备保护可分为远后备和近后备保护两种，远后备是指主保护或断路器拒绝时，由相邻元件的保护部分实现的后备；近后备是指当主保护拒绝动作时，由本元件的另一套保护来实现的后备，当断路器拒绝动作时，由断路器失灵保护实现后备。辅助保护是指为了补充主保护和后备保护的不足而增设的简单保护。

继电保护装置需有操作电源供给保护回路、断路器跳、合闸及信号等二次回路。按操作电源性质的不同，可以分为直流操作电源和交流操作电源。通常在发电厂和变电所中继电保护的操作电源是由蓄电池直流系统供电，因蓄电池是一种独立电源，最大的优点是工作可靠，但缺点是投资较大、维护麻烦。交流操作电源的优点是投资少，维护简便，但缺点是可靠性差。因此，交流操作电源的继电保护适合于中小型变电所，特别是农村小型变电所的使用。

1.4　传统继电保护装置的要求

继电保护装置为了完成它的任务，必须在技术上满足选择性、快速性、灵敏性和可靠性 4 个基本要求。对于作用于继电器跳闸的继电保护，应同时满足 4 个基本要求。对于作用于信号以及只反映不正常的运行情况的继电保护装置，这 4 个基本要求中有些要求如速动性可以降低。现将 4 个基本要求分述如下。

1.4.1　可靠性

可靠性包括安全性和信赖性，是对继电保护最根本的要求。所谓安全性是要求继电保护在不需要它动作时可靠不动作，即不发生误动。所谓信赖性是要求继电保护在规定的保护范围内发生了应该动作的故障时可靠动作，即不拒动。

安全性和信赖性主要取决于保护装置本身的制造质量、保护回路的连接和运行维护的水平。一般而言，保护装置的组成元件质量越高、回路接线越简单，保护的工作就越可靠。同时正确的调试、整定、运行及维护，对于提高保护的可靠性都具有重要的作用。

继电保护的误动作和拒动作都会给电力系统带来严重危害。然而，提高不误动的安全措施与提高不拒动的信赖性措施往往是矛盾的。由于不同的电力系统结构和负荷性质不同，电力元件在电力系统中的位置不同，误动和拒动的危害程度不同，因而提高安全性和信赖性的侧重点在不同的情况下有所不同。例如，对 220kV 及以上系统，由于电网联系比较紧密，联络线较多，系统备用容量较多，如果保护误动，使某条线路、某台发电机或变压器误动切除，给整个电力系统造成直接经济损失较小。但如果保护装置拒动，将会造成电力元件的损坏或者引起系统稳定的破坏，造成大面积的停电。在这种情况下一般应该更强调保护不拒动的信赖性，目前要求每回 220kV 及以上输电线路都装设两套工作原理不同、工作回路完全独立的快速保护，采取各自独立跳闸的方式，提高不拒动的信赖性。而对于母线保护，由于它的误动将会给电力系统带来严重后果，因此，更强调不误动的安全性，一般以两套保护出口触点串联后起动跳闸回路的方式。

即使对于相同的电力元件，随着电网的发展，保护不误动和不拒动对系统的影响也会发生变化。例如，一个更高一级电网建设初期或大型电厂投产初期，由于联络线较少，输送容量较大，切除一个元件就会对系统产生很多影响，此时，防止误动就最为重要；随着电网建设的发展，联络线路愈来愈多，联系愈来愈紧密，防止拒动就变为最重要的。在说明防止误动更重要的时候，并不是说拒动不重要，而是说在保证防止误动的同时，要充分防止拒动；反之亦然。

1.4.2　选择性

所谓选择性就是指当电力系统中的设备或线路发生短路时，其继电保护仅将故障的设备或线路从电力系统中切除，当故障设备或线路的保护或断路器拒动时，应由相邻设备或线路的保护将故障切除。

如图 1.6 所示网络中，当 k_1 点发生短路故障时，应由故障线路上的保护 1 和 2 动作，将故障线路切除，这时变电所 B 则仍可由另一条非故障线路继续供电。当 k_3 点发生短路故障时，应由线路的保护 6 动作，使断路器 6QF 跳闸，将故障线 C-D 切除，这时只有变电所 D 停电。由此可见 ，继电保护有选择性的动作可将停电范围限制到最小，甚至可以作到不中断对用户的供电。

在要求保护动作有选择性的同时，还必须考虑保护或断路器有拒动的可能性，因而就需要考虑后备保护的问题。

当 k_3 点发生短路故障时，距短路点最近的保护 6 应动作切除故障，但由于某种原因，该处的保护或断路器拒动，故障便不能消除，此时如其前面一条线路（靠近电源测）的保护 5 动作，故障也可消除。此时保护 5 所起的作用就称为相邻元件的后备保护。同理保护 1 和 3 又应该作为保护 5 和 7 的后备保护。由于按以上方式构成的后备保护是在远处实现的，因此，又称为远后备保护。

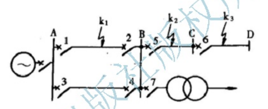


图 1.6　单侧电源网络中有选择性动作的说明图

一般情况下远后备保护动作切除故障时将使供电中断的范围扩大。

在复杂的高压电网中当实现远后备保护有困难时，也可采用近后备保护的方式。即当本元件的主保护拒绝动作时，由本元件的另一套保护作为后备保护；当断路器拒绝动作时，由同一发电厂或变电所内的有关断路器动作，实现后备。为此，在每一个元件上应装设简单的主保护和后备保护，并装设必要的断路器失灵保护。由于这种后备保护作用是在主保护安装处实现，为近后备保护。

应当指出，远后备保护的性能是比较完善的，它对相邻元件的保护装置、断路器、二次回路和直流电源引起的拒绝动作，均能起到后备作用，同时实现简单、经济，因此，在电压较低的线路上应优先采用，只有当远后备不能满足灵敏度和速动性的要求时，才考虑采用近后备的方式。

1.4.3 速动性

所谓速动性就是指继电保护装置应能尽快地切除故障，以减少设备及用户在大电流、低电压运行的时间，降低设备的损坏程度，提高系统并列运行的稳定性。动作迅速而又能满足选择性要求的保护装置，一般结构都比较复杂，价格昂贵，对大量的中、低压电力设备，不一定都采用高速动作的保护。对保护速动性的要求应根据电力系统的接线和被保护设备的具体情况，经技术经济比较后确定。一般必须快速切除的故障有：

（1）使发电厂或重要用户的母线电压低于有效值（一般为 0.7 倍额定电压）；

（2）大容量的发电机、变压器和电动机内部故障；

（3）中、低压线路导线截面过小，为避免过热不允许延时切除的故障；

（4）可能危及人身安全、对通信系统或铁路信号造成强烈干扰的故障。

在高压电网中，维持电力系统的暂态稳定性往往成为继电保护快速性的决定性因素，故障切除愈快，暂态稳定极限（维持故障切除后系统的稳定性所允许的故障前输送功率）愈高，愈能发挥电网的输电效能

故障切除时间包括保护装置和断路器动作时间，一般快速保护的动作时间为 0.04～0.08s，最快的可达 0.01～0.04s，一般断路器的跳闸时间为 0.06～0.15s,，最快的可达 0.02～0.06s。

但应指出，要求保护切除故障达到最小时间并不是在任何情况下都是合理的，故障必须根据技术条件来确定。实际上，对不同电压等级和不同结构的电网，切除故障的最小时间有不同的要求。例如，对于 35～60kV 配电网络，一般为 0.5～0.7s；110～330kV 高压电网，约为 0.15～0.3s；500kV 及以上超高压电网，约为 0.1～0.12s。目前国产的继电保护装置，在一般情况下，完全可以满足上述电网对快速切除故障的要求。

对于反应不正常运行情况的继电保护装置，一般不要求快速动作，而应按照选择性的条件，带延时地发出信号。

1.4.4 灵敏性

灵敏性是指电气设备或线路在被保护范围内发生短路故障或不正常运行情况时，保护装置的反应能力。能满足灵敏性要求的继电保护，在规定的范围内故障时，不论短路点的位置和短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，都能正确反应动作，即要求不但在系统最大运行方式下三相短路时能可靠动作，而且在系统最小运行方式下经过较大的过渡电阻两相或单相短路故障时也能可靠动作。

所谓系统最大运行方式就是被保护线路末端短路时，系统等效阻抗最小，通过保护装置的短路电流为最大运行方式；系统最小运行方式就是在同样短路故障情况下，系统等效阻抗为最大，通过保护装置的短路电流为最小的运行方式。

保护装置的灵敏性是用灵敏系数来衡量。灵敏系数表示式为：

（1）对于反应故障参量增加（如过电流）的保护装置：

$$\text{灵敏系数}=\frac{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置动作参数的整定值}}$$

（2）对于反应故障参量降低（如低电压）的保护装置：

$$\text{灵敏系数}=\frac{\text{保护装置动作参数的整定值}}{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最大计算值}}$$

故障参数如电流、电压和阻抗等的计算，应根据实际可能的最不利的运行方式和故障类型来进行。

增加灵敏性，即增加了保护动作的信赖性，但有时与安全性相矛盾。对不同作用的保护及被保护的设备和线路，所要求的灵敏系数不同，其值见附录 1 所示。

以上 4 个基本要求是设计、配置和维护继电保护的依据，又是分析评价继电保护的基础。它们之间是相互联系的，但往往又存在着矛盾。对它们中的每一项要求都应有度，不应片面强调某一项而忽略另一项。对 4 项的要求应以满足电力系统的安全运行为准则。由于要求保护装置既不误动，又不拒动，这两项相互对立的方面必须警惕，任何提高灵敏度的措施都有可能造成误动的可能，而任何加装闭锁防止误动的措施都有可能造成拒动的可能。当然只是一种可能性

如：为了保证选择性，有时就要求保护动作必须具有一定的延时：为了保证灵敏性，有时就允许保护装置无选择性地动作，再采用自动重合闸装置进行纠正：为了保证动作迅速和灵敏性，有时就采用比较复杂和可靠性稍差的保护。因此，在设计继电保护和使用继电保护装置时，要根据具体情况（被保护对象、电力系统条件、运行经验等）分清主次，统筹兼顾，获取相对最优的整定结果。

1.5　继电保护装置的新要求

1.5.1 精简性

这一性能要求最早是西屋公司提出的。随着继电保护技术的发展和电力系统对保护装置要

求的提高，继电保护装置功能和结构越来越复杂。从预想来说，自然保护性能会不断提高，但结构过分复杂会给装置调试、维护带来很大困难，反而使实际性能下降。

需要指出的是，在计算机保护装置中，保护功能是由软件设计取得的，功能增加不需要增加硬件设备，但是如果功能过于复杂，顾此失彼，且整定困难，实际应用上不能取得很好的效果。

所以，随着保护技术、电子技术和计算机技术的不断发展，继电保护装置的功能和结构应注意其精简性，有些需要依靠精确计算才能整定的功能，引入时要慎重。

1.5.2 自适应性

继电保护装置服务于电力系统的安全运行，有些保护在原理上使保护的动作特性与电力系统运行方式或故障状态有关。设计人员希望当系统运行方式或故障状态改变时，保护的动作特性向改善保护装置工作特性方向转变，即自适应性。

实际上保护装置自适应性很早就已经被利用了，例如，反时限电流保护就具有一定的自适应性，线路反时限电流保护能自适应故障点位置改善和保护装置动作选择性，电机的反时限保护能自适应被保护电机允许发热情况等。

随着电力系统的发展，保护装置的构成变得愈加复杂，而且运行特性受电力系统运行方式的变化影响加大，因此，精简性、自适应性也将会成为继电保护工作者不得不考虑的问题。

1.6 继电保护的发展历程

继电保护技术是随着电力系统的发展而发展起来的。电力系统发生短路是不可避免的，短路必然伴随着电流的增大，因而，为了保护发电机免受短路电流的破坏，首先出现了反应电流超过一预定值的过流保护。熔断器就是最早的、最简单的过电流保护。这种保护方式时至今日仍广泛应用于低压线路和用电设备。熔断器的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体，因而最为简单。由于电力系统的发展，用电设备功率、发电机的容量不断增大，熔断器已不能满足选择性和快速性的要求，于是出现了作用于专门的断流装置（断路器）的过电流继电器。1890年后出现了装于断路器上并直接作用于断路器的一次式（直接反应于一次短路电流）的电磁型过电流继电器。19世纪初，随着电力系统的发展，继电器才开始广泛应用于电力系统的保护。这个时期可认为是继电器保护技术发展的开端。

1901年出现了感应型过电流继电器。1908年提出了比较被保护元件两端电流的电流差动保护原理。1910年方向电流保护开始得到应用，在此时期也出现了将电流与电压比较的保护原理，并导致了1920年后距离保护装置的出现。随着电力系统载波通讯的发展，在1927年前后，出现了利用高压输电线上高频载波电流传送和比较输电线两端功率方向或电流相位的高频保护装置。20世纪50年代就出现了利用故障点产生的行波实现快速继电保护的设想，经过20余年的研究，终于诞生了行波保护装置。显然，随着光纤通信将在电力系统中的大量采用，利用光纤通道的继电保护必须广泛的应用。

以上是继电保护原理的发展过程。与此同时，构成继电保护装置的元件、材料、保护装置的结构型式和制造工艺也发生了巨大的变革。经历了机电式保护装置、静态保护装置和数字式保护装置3个发展阶段。

机电式保护装置由具有机械传动部件带动触点断开、闭合的机电式继电器如电磁型、感应型和电动型组成，由于其工作比较可靠，不需要外加电源，抗干扰性能好，使用了相当长时间，特别是单个继电器目前仍在电力系统中广泛使用。但由于这种保护装置体积大、动作速度慢、触点易磨损和粘连，调试维护比较复杂，难于满足超高压、大容量电力系统的需要。

20世纪50年代，随着晶体管的发展，出现了晶体管保护装置。这种保护装置体积小、动作速度快、无机械转动部分，经过20余年的研究与实践，晶体管式保护装置的抗干扰问题从理论和实际都得到了满意的解决。20世纪70年代，晶体管保护在我国被大量采用。随着集成电路的发展，可以将许多晶体管集成在一快芯片上，从而出现了体积更小、工作更可靠的集成电

路保护。20 世纪 80 年代后期，静态继电保护装置由晶体管式向集成电路式过渡，成为静态继电保护的主要形式。

20 世纪 60 年代末，有人就提出了用小型计算机实现继电保护的设想，但由于小型计算机当时价格昂贵，难于实际采用。由此开始了对继电保护计算机算法的大量研究，这为后来微型计算机式保护的发展奠定了理论基础。随着微处理器技术的快速发展和价格的急剧下降，在 20 世纪 70 年代后期，便出现了性能比较完善的微机保护样机并投入运行。80 年代微机保护在硬件和软件技术方面已趋成熟，进入 90 年代，微机保护已在我国大量应用，主运算器由 8 位机、16 位机发展到目前的 32 位机；数据转换与处理器件由模数转换器（A/D）、压频转换器（VFC），发展到数字处理器（DSP）。这种由计算机技术构成的继电保护称为数字式继电保护。如图 1.5 所示。这种保护可用相同的硬件实现不同原理的保护，使制造大为简化，生产标准化、批量化，硬件可靠性高；具有强大的存储、记忆和运算功能，可以实现复杂原理的保护，为新原理保护的发展提高了实现条件。除了实现保护功能外，还可兼有故障录波、故障测距、事件顺序记录和保护管理中心计算机及调度自动化系统通信等功能，这对于保护的运行管理、电网事故分析及事故后的处理等均有重要意义。另外它可以不断地对本身的硬件和软件自检，发现装置的异常情况并通知运行维护中心。

由于网络的发展与电力系统中的大量采用，给微机保护提供了很大的发展空间。微机硬件和软件功能的空前强大、变电站综合自动化和调度自动化的兴起和电力系统光纤通信网络的逐步形成，从而使得微机保护不能也不应该再是一个孤立的、任务单一的、“消极待命”的装置，而应该是积极参与、共同维护电力系统整体安全稳定运行的计算机自动控制系统的基本组成单元。微机保护不仅要能实现被保护设备的切除及自动重合，还可作为自动控制系统的终端，接收调度命令实现跳、合闸等操作，以及故障诊断、稳定预测、安全监视、无功调节、负荷控制等功能。

此外，由于计算机网络提供数据信息共享的优越性，微机保护可以占有全系统的运行数据和信息，应用自适应原理和人工智能方法使保护原理、性能和可靠性得到进一步的发展和提高，使继电保护技术沿着网络化、智能化、自适应和保护、测量、控制、数据通信于一体的方向不断发展。

近年来，由于我国经济的迅猛发展，一个坚强庞大的电力网络已初步形成，从而也给广大的电力研发工作者提供了很好的机遇，虽然我们国家继电保护水平已跃居世界前列，但还应继续努力，不断提高继电保护的水平，时刻保证电网的安全可靠运行。目前现场使用的微机型继电保护装置如图 1. 7 所示。



图 1. 7 微机型继电保护装置

1.7 电力系统继电保护工作者的要求

继电保护在电力系统中的作用及其对电力系统安全连续供电的重要性，要求继电保护必须具有一定的性能、特点，因而对继电保护工作者也应提出相应的要求。继电保护的主要特点及对保护工作者的要求如下。

(1)电力系统是由很多复杂的一次主设备和二次保护、控制、调节、信号等辅助设备组成的一个有机整体。每个设备都有其特有的运行特性和故障时的工况。任一设备的故障都将立即引起系统正常运行状态的改变或破坏，给其他设备以及整个系统造成不同程度的影响。因此，继电保护的工作牵涉到每个电气主设备和二次辅助设备。这就要求继电保护工作者对所有这些设备的工作原理、性能、参数计算和故障状态的分析等有深刻地理解，还要有广泛的生产运行知识。此外对于整个电力系统的规划设计原则、运行方式制订的依据、电压及频率调节的理论、潮流及稳定计算的方法以及经济调度、安全控制原理和方法等都要有清楚的概念。

(2)电力系统继电保护是一门综合性的科学，它奠基于理论电工，电机学和电力系统分析等基础理论，还与电子技术、通信技术、计算机技术和信息科学等新理论、新技术有着密切的关系。纵观继电保护技术的发展史，可以看到电力系统通信技术上的每一个重大进展都导致了一种新保护原理的出现，例如高频保护、微波保护和光纤保护等；每一种新电子元件的出现也都引起了继电保护装置的革命。由机电式继电器发展到晶体管保护装置、集成电路式保护装置和微机保护，就充分说明了这个问题。目前微机保护的普及及光纤通信和信息网络的实现正在使继电保护技术的面貌发生根本的变化。在继电保护的设计、制造和运行方面都将出现一些新的理论、新的概念和新的方法。由此可见，继电保护工作者应密切注意相邻学科中新理论、新技术、新材料的发展情况，积极而慎重地运用各种新技术成果，不断发展继电保护的理论、提高其技术水平和可靠性指标，改善保护装置的性能，以保证电力系统的安全运行。

(3)继电保护是一门理论和实践并重的学科。为掌握继电保护装置的性能及其在电力系统故障时的动作行为，既需运用所学课程的理论知识对系统故障情况和保护装置动作行为进行分析，还需对继电保护装置进行实验室试验、数字仿真分析、在电力系统动态模型上试验、现场人工故障试验以及在现场条件下的试运行。仅有理论分析不能认为对保护性能的了解是充分的。只有经过各种严格的试验，试验结果和理论分析基本一致，并满足预定的要求，才能在实践中采用。因此，要搞好继电保护工作不仅要善于对复杂的系统运行和保护性能问题进行理论分析，还必须掌握科学的实验技术，尤其是在现场条件下进行调试和实验的技术。

(4)继电保护的工作稍有差错，就可能对电力系统的运行造成严重的影响，给国民经济和人民生活带来不可估量的损失。国内、外几次电力系统瓦解，进而导致广大地区工、农业生产瘫痪和社会秩序混乱的严重事故，常常是一个继电保护装置不正确动作引起的。因此，继电保护工作者对电力系统的安全运行肩负着重大的责任。这就要求继电保护工作者具有高度的责任感，严谨细致的工作作风，在工作中树立可靠性第一的思想。此外，还要求他们有合作精神，主动配合各规划、设计和运行部门分析研究电力系统发展和运行情况，了解对继电保护的要求，以便及时采取应有的措施，确保继电保护满足电力系统运行的要求。

注意：需要说明的是，继电保护的绝大多数不正确动作情况并不难分析，而是“始料不及”酿成大错，不是分析不了，而是不知道该分析什么。

随着运行经验的不断积累，现在对应考虑的问题清楚多了。必须考虑的应是实际可能发生的故障。对于个别稀有的情况，只要全系统继电保护动作的总体评价是正确的，个别保护装置的动作不恰当，只要未扩大事故就不必修改，以免顾此失彼反而降低了在常见故障中的性能。

凡是应由一次系统解决的问题就不应由继电保护来解决，继电保护工作者不要包揽这些事情。如在一个由系统单侧电源供电的地区，可能有小水电并网运行。一旦系统供电中断，地区频率急剧下降（可能接近 30Hz），使得有些继电器的工作混乱，很可能导致保护误动，但并未扩大事故，若在如此低的频率下仍要求继电器正常工作，那就没有道理了。

【本章小结】本章为学习本课程提供了基础知识，主要介绍了继电保护装置的组成、工作原理、实现方法及发展历程，同时对继电保护装置四性的要求进行了详细的分析。通过学习，使大家认识到，在实际中往往要想兼顾四性的要求是很难的，因此，今后工作中，应根据网络的情况，负荷的重要程度等因素分清主次，统筹兼顾，从而获取相对最优的定值。

【关键词】 继电器 Relay ； 继电保护装置 Relay Protection Equipment ； 继电保护 Relay Protection； 可靠性 Reliability； 选择性 Selectivity； 快速性 Rapidity； 灵敏性 Sensitivity

【阅读材料】 面向21世纪的智能电网

智能电网是自动的和广泛分布的能量交换网络，它具有电力和信息双向流动的特点，同时能够监测从发电厂到用户电器之间的所有元件，其总体设想为：

智能化：具有可遥感系统过载的能力和网络自动重构，即“自愈”的能力，以防止或减轻潜在的停电；在系统需要作出人为无法实现的快速反应时，能根据电力公司、消费者和监管人员的要求，自主地工作。

高效：少增加乃至不增加基础设施就能满足日益增长的消费需求。

包容：能够容易和透明地接受任何种类的能量，包括太阳能和风能；能够集成各种各样已经得到市场证明和可以接入电网的优良技术，如成熟的储能技术。

激励：使消费者与电力公司之间能够实时地沟通，从而消费者可以根据个人偏好定制其电能消费。

机遇：具有随时随地利用即插即用创新的能力，从而创造新的机遇和市场。

重视质量：能够提供数字化经济所需要的可靠性和电能质量（如，极小化电压的凹陷、尖峰、谐波、干扰和中断）。

鲁棒：自愈、更为分散并采用了安全协议，使系统有抵御人为攻击和自然灾害的能力。

环保：减缓全球气候变化，提供可大幅度改善环境的切实有效的途径。

智能电网将像互联网那样改变人们的生活和工作方式，并激励类似的变革。但由于其本身的复杂性和涉及广泛的利益相关者，实现智能电网需要漫长的过渡、持续的研发和多种技术的长期共存。

资料来源：科学时报 ，余贻鑫等

习 题

1.1 填空题

1. 故障发生后对电力系统造成的后果有______ 、_______ 、______ 。

2. 电气设备运行超过额定电流时将引起______ 、_______ 、______ 、_______ 等。

3. 继电保护的基本任务是 _______ 、 _______ 。

4. 继电器是_______ 的一种自动器件；继电保护装置由 _______ 组成，一般分______ 、 ______ 、_______ 部分。

5. 缩短故障切除时间就必须 _______ 和 _______ 。

6．所谓运用中的设备是指_____ 或_______ 带电及 _______ 带电的设备。

7．实际工作中只能用_______ 的方法校验保护回路和整定值的正确性。

8．电网继电保护的整定不能兼顾速动性、选择性或灵敏性时按下列原则取舍：局部电网服从整个电网；下级电网_____ 上一级电网；局部问题 ______ ；尽量照顾局部电网和下级电网的需要，保证重要用户供电。

9．在某些情况下，必须加速切除短路时，可使保护_______ 动作。但必须采用补救措施，如重合闸和备自投来补救。

10. 电力设备由一种运行方式转为另一种运行的操作过程中，被操作的由关设备均应在 _______ ，部分保护装置可短时失去 ________ 。

1.2 选择题

1. 继电保护工作经常强调防止“三误”事故的发生,“ 三误”是指（ ）。

A． 误入间隔，误接线，误投压板

B． 误碰，误接线，误整定

C． 误碰，误接线，误试验

2. 我国继电保护装备技术进步先后经历了五个阶段，其发展顺序依次是（ ）。

A． 机电型，晶体管型，整流型，集成电路型，微机型

B． 机电型，整流型，集成电路型，晶体管型，微机型

C． 机电型，整流型，晶体管型，集成电路型，微机型

3. 电力系统继电保护和安全自动装置的科研、设计、制造、施工和运行等有关部门共同遵守的基本技术原则是（ ）。

A． 继电保护和安全自动装置技术规程

B． 继电保护和安全自动装置检验条例

C． 继电保护和安全自动装置运行管理规程

4. 继电保护装置检验分类为（ ）。

A． 验收检验，定期检验，补充检验

B． 验收检验，部分检验，事故后检验

C． 整组检验，全部检验，部分检验

5. 继电保护和安全自动装置是电力系统的重要组成部分。确定电力网结构、厂站主接线和运行方式时，必须与（ ）统筹考虑，合理安排。

A． 设计和基建部门

B． 继电保护和安全自动装置的配置

C． 投资方和运行单位

6. 所有继电保护装置新投入运行后的第一年内需进行一次（ ）。

A． 全部检验　　B． 部分检验　　C． 补充检验

7. 为防止继电保护“三误”事故，凡是在现场接触到运行的继电保护、安全自动装置及其二次回路的所有人员，除必须遵守《电业安全工作规程》外，还必须遵守（ ）。

A． 继电保护和电网安全自动装置现场工作保安规定

B． 继电保护及电网安全自动装置检验条例

C． 继电保护和电网安全自动装置技术规程

8．自耦变压器中性点必须接地，是为了避免当高压侧电网发生单相接地故障时（ ）。

A． 高、中压侧均出现过电压　B． 高压侧出现过电压　C． 中压侧出现过电压

9．（　）一般由测量部分、逻辑部分和执行部分构成。

A．　继电器　　　　　　B．　继电保护装置　　　　　　C．　继电保护

10．继电保护后备保护逐级配合是指(　　)。

A．时间配合　　　　　　B．时间和灵敏度均配合性　　　　　　C．灵敏度配合

1.3 判断题

1．在最大运行方式下，电流保护的保护区大于最小运行方式下的保护区。　（　）

2．继电保护装置是保证电力元件安全运行的基本装备，任何电力元件不得在无保护的状态下运行。　（　）

3．大接地电流系统是指所有变压器中性点均直接接地的系统。　（　）

4．在我国，系统零序电抗与正序电抗地比值是大接地电流系统与小接地电流系统地划分标准。　（　）

5．继电保护装置的电磁兼容性是指它具有一定的耐受电磁干扰的能力，对周围电子设备产生较小的干扰。　（　）

6．系统运行方式越大，保护装置的动作灵敏度越高。　（　）

7．自耦变压器中性点必须直接接地运行。　（　）

8．快速切除线路和母线的短路故障是提高电力系统静态稳定的重要手段。　（　）

9．主保护的双重化主要是指两套主保护的交流电流、电压和直流电源彼此独力；有独立的选相功能；有两套独力的保护专（复）用通道；断路器有两个跳闸线圈，每套主保护分别起动一组。　（　）

10．对于 220kV 及以上电网不宜选用全星形自耦变压器，以免恶化接地故障后备保护的运行整定。　（　）

1.4 问答题

1. 什么是系统最大运行方式？什么是系统最小运行方式？对继电保护来说，怎样理解最大、最小运行方式？

2. 继电保护装置整定试验的原则是什么？

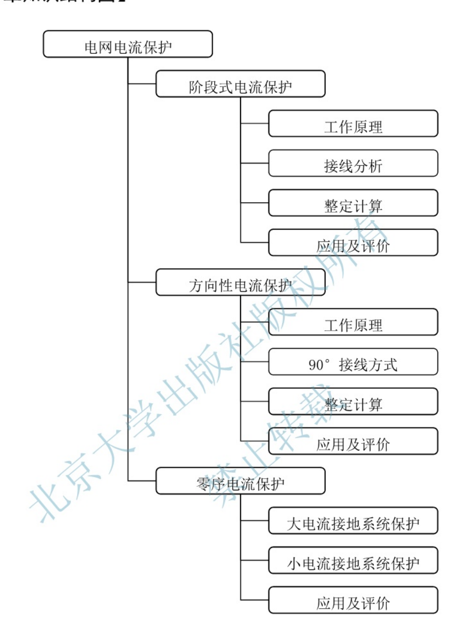
3. 电网继电保护的整定不能兼顾速动性、选择性或灵敏性要求时，应按什么原则合理进行舍取？

4．超高压线路按什么原则实现主保护的双重化？

5. 何谓继电保护装置、继电器、继电保护系统、继电保护？

第 2 章　电网的电流保护

【本章知识结构图】



电网正常运行时，输电线路上流过正常的负荷电流，母线电压为额定电压。当输电线路发生短路时，故障相电流增大，根据这一特征，可以构成反应故障时电流增大而动作的电流保护，如何对输电线路构成保护并保证其选择性，通过本章学习之后，即可予以解答。

【本章教学目标与要求】

熟悉继电器的分类及工作原理；

掌握单侧、多电源网络电流保护的实现原理及整定原则；

掌握大电流接地系统零电流序保护的原理及整定原则；

熟悉小电流接地系统保护的特点及实现方法。



本章导图　1000kV 特高压输电线路

2.1　单侧电源网络相间短路的电流保护

2.1.1　反应单一电气量的继电器

1. 继电器的分类

继电器是根据某种输入信号来实现自动切换电路的自动控制电器。当其输入量达到一定值时，能使其输出的被控制量发生预计的状态变化，如触点打开、闭合或电平由高变低、由低变高等，具有对被控制电路实现“通”、“断”控制的作用，所以它“类似于开关”。

继电器的基本原理是：当输入信号达到某一定值或由某一定值突跳到零时，继电器就动作，使被控制电路通断。它的功能是反应输入信号的变化以实现自动控制和保护。所以，继电器也可以这样定义：能自动地使被控制量发生跳跃变化的控制元件称为继电器。

在电力系统继电保护回路中，常用继电器的实现原理随着相关技术的发展而变化。目前仍在使用的继电器按输入信号的性质可分为电气继电器(如电流继电器、电压继电器、功率继电器、阻抗继电器等)和非电气继电器(如温度继电器、压力继电器、速度继电器、瓦斯继电器等)两类；按工作原理可分为电磁式、感应式、电动式、电子式(如晶体管型)、整流式、热式(利用电流热效应的原理)、数字式等；按输出形式可分为有触点式和无触点式；按用途可分为控制继电器(用于自动控制电路中)和保护继电器(用于继电保护电路中)。

保护继电器按其在继电保护装置中的功能，可分为主继电器(如电流继电器、电压继电器、阻抗继电器等)和辅助继电器(如时间继电器、信号继电器、中间继电器等)。

2. 继电器的基本组成与原理

继电器主要由反应机构、执行机构和中间机构三个部分组成。反应机构也称输入部分，其作用是能够反应外界一定的输入信号，并将其变换成继电器动作的某种特定的物理量(也称其为感受和变换功能)，如电磁式电流继电器的电磁系统，它反应输入的电流信号并将其变换为电磁力。执行机构也称输出部分，其作用是对被控制电路实现通断控制，它分为有

触点式的(如电磁式电流继电器的触头系统)和无触点式的(如电子式继电器，其中的晶体管、晶闸管具有导通和截止两种状态，可实现通断控制，所以是执行机构)。比较机构也称中间部分，它处于反应机构和执行机构之间，其作用是将输入部分反应并变换的物理量与继电器的动作值进行比较，以决定执行机构是否动作(简称为比较功能)。为何要进行比较？因为继电器并不是在任意一个输入量下都可以使执行机构动作的，只有输入量达到一定值时才动作。如电磁式电流继电器的复位弹簧，事先对其调整使其具有一定的弹簧力，只有当电磁力的作用大于此弹簧力的作用时，才能使执行机构动作，所以复位弹簧就是比较机构。

3. 过电流继电器的原理框图

过电流继电器原理框图如图 2.1 所示，来自电流互感器 TA 二次侧的电流 I，加入到继电器的输入端，根据电流继电器的实现型式，例如电磁型，则不需要经过变换，直接接入过电流继电器的线圈。若是电子型和数字型，由于实现电路是弱电回路，需要线性变换成弱电回路所需的信号电压。根据继电器的安装位置和工作任务给定动作值 I_{set}，为使继电器有普遍的使用价值，动作值 I_{set} 可以调整。当加入到继电器的电流 I_r 大于动作值时，比较环节有输出。在电磁型继电器中，由于需要靠电磁转矩驱动机械触点的转动、闭合，需要一定的功率和时间，继电器又有自身固有的动作时间（几毫秒），一般的干扰不会造成误动；对于电子型和数字型继电器，动作速度快、功率小，为提高动作的可靠性，防止干扰信号引起的误动作，故考虑了必须使测量值大于动作值的持续时间不小于 2～3ms 时，才能动作于输出。

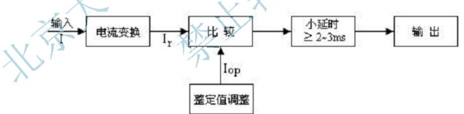


图 2.1　过电流继电器原理框图

4. 继电器的继电特性

继电器的继电特性(也称控制特性)是指继电器的输入量和输出量在整个变化过程中的相互关系。对于电磁式电流继电器，其继电特性如图 2.2 所示。

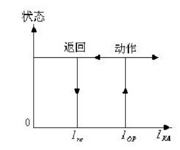


图 2.2　继电器的继电特性

当 $I_{KA} < I_{set}$ 时，继电器不动作，而当 $I_{KA} \geq I_{set}$ 时，继电器突然迅速动作。动作后，当保持 $I_{KA} > I_{set}$ 时，继电器保持动作后状态。只有当 $I_{KA} \leq I_{re}$ 时，继电器才突然返回到原位。

无论是动作还是返回，继电器都是从起始位置到最终位置，它不可能停留在某一个中间位置上。这种特性就称之为继电器的“继电特性”。

为保证继电器动作后有可靠地输出，防止当输入电流在整定值附近波动时输出不停地跳变，在加入继电器的电流小于返回电流 I_{re} 时，继电器才返回，返回电流 I_{re} 小于动作电流 I_{set}。电流由较小值上升到动作电流及以上，继电器由不动作到动作；电流减小到返回电流 I_{re} 及以下，继电器由动作再到返回。其整个过程中输出应满足“继电特性”的要求。

5. 继电器的返回系数

继电器的返回系数是指返回电流与动作电流的比值，即

$$K_{re}=\frac{I_{re}}{I_{set}} \tag{2-1}$$

K_{re} 是一个重要的参数，在实际应用中要求继电器有较高的返回系数。对于电磁式电流继电器来说，可以采用坚硬的轴承以减小摩擦转矩 M_m，或改善磁路系统的结构以适当减小剩余转矩等方法来提高返回系数。

一般情况下，反应电气量增加而动作的继电器，称过量继电器。其返回系数小于 1，但要求其不小于 0.85。反应电气量降低而动作的继电器，称欠量继电器。其返回系数大于 1，但要求其不大于 1.2。

6. 对继电器的基本要求

对继电器的基本要求是工作可靠，动作过程具有“继电特性”。继电器的工作可靠是最重要的，主要是通过各部分结构设计合理、制造工艺先进、经过高质量检测等来保证。其次要求继电器动作值误差小、功率损耗小、动作迅速、动稳定性和热稳定性好以及抗干扰能力强。另外，还要求继电器安装、整定方便，运行维护少，价格便宜等。

2.1.2 电流速断保护

在保证选择性和可靠性要求的前提下，根据对继电保护快速性的要求，原则上应装设快速动作的保护装置，使切除故障的时间尽可能短。反应电流增加，且不带时限(瞬时)动作的电流保护称为无时限电流速断保护，简称电流速断保护。

1. 工作原理

对于图 2.3 所示的单侧电源辐射形电网，为切除故障线路，需在每条线路的电源侧装设断路器和相应的保护装置，即无时限电流速断保护分别装设在线路 L_1、L_2 的电源侧(也称为线路的首端)。当线路上任一点发生三相短路时，通过被保护元件(即线路)的电流为

$$I_k^{(3)}=\frac{E_S}{Z_S+Z_1L_k} \tag{2-2}$$

式中 E_S——系统等效电源的相电势，也可以是母线上的电压；

Z_S——保护安装处到系统等效电源之间的阻抗，即系统阻抗；

Z_1——线路单位长度的正序阻抗，单位为 Ω/km；

L_k——短路点至保护安装处之间的距离。

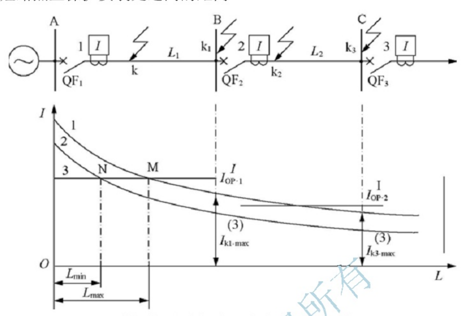


图 2.3　单侧电源辐射形电网电流速断保护工作原理图

若 E_S 和 Z_S 为常数，则短路电流将随着 L_k 的减小而增大，经计算后可绘出其变化曲线，如图 2.3 所示。若 Z_S 变化，即当系统运行方式变化时，短路电流都将随着变化。

当系统阻抗最小时，流经被保护元件短路电流最大的运行方式称为最大运行方式。图 2.3 中曲线 1 表示系统在最大运行方式下短路点沿线路移动时三相短路电流的变化曲线。

短路时系统阻抗最大，流经被保护元件短路电流最小的运行方式称为最小运行方式。在最小运行方式下，发生两相短路时通过被保护元件的电流最小，即最小短路电流为

$$I^{(2)}_{k\cdot min}=\frac{\sqrt{3}}{2}\quad\frac{E_S}{Z_{s\cdot max}+Z_1L_k} \tag{2-3}$$

式中，$Z_{S\cdot max}$ 为最小运行方式下的系统阻抗；L_k 为短路点至保护安装处的距离。图 2.3 中曲线 2 表示系统在最小运行方式下短路点沿线路移动时最小短路电流的变化曲线。

对于线路 L_1 的无时限电流速断保护 1，当本线路上任一点 k 发生短路时，保护 1 为瞬动保护。为保证选择性，在下一线路首端 k_2 点短路时，保护 1 不应动作，即保护 1 的电流速断保护的动作电流 $I^{I}_{set\cdot 1}$ 应该大于最大运行方式下 k_2 点三相短路时流过被保护元件的短路电流 $I^{(3)}_{k\cdot max}$，即 $I^{I}_{set\cdot 1}>I^{(3)}_{k\cdot 2max}$。由于 k_2 点短路时与本线路末端 k_1 点短路时流经被保护元件的短路电流相等，因此，$I^{I}_{set\cdot 1}$ 也可按大于最大运行方式下 k_1 点三相短路时流经被保护元件的短路电流 $I^{(3)}_{k1\cdot max}$ 来整定，即

$$I^{I}_{set\cdot 1}=K^{I}_{rel}\cdot I^{(3)}_{k1\cdot max} \tag{2-4a}$$

式中　K^{I}_{rel}——电流速断保护的可靠系数，一般取 1.2～1.3。

引入可靠系数的原因是由于理论计算与实际情况之间存在着一定的差别，即必须考虑实际上存在的各种误差影响，如实际的短路电流可能大于计算值；对瞬时动作的保护还应考虑非周期分量使总电流变大的影响；保护装置中电流继电器的实际启动电流可能小于整

定值；考虑一定的裕度，从最不利的情况出发，即使同时存在以上几种因素的影响，也可能保证在预定的保护范围以外故障时，保护装置不误动，因而必须乘以大于 1 的可靠系数，一般取 1.2～1.3。

同理，保护 2 电流速断保护的动作电流应为

$$I_{\text{set}\cdot 2}^{\text{I}} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot I_{\text{k3}\cdot\max}^{(3)} \tag{2-4b}$$

动作电流整定后是不变的，如图 2.3 中的直线 3，它与曲线 1、2 各有一个交点 M 和 N。在交点以前的线路上发生短路故障时，由于 $I_{\text{k}} > I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}$，保护 1 的电流速断保护能够动作；在交点以后的线路上短路时，由于 $I_{\text{k}} < I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}$，保护不能动作。因此，电流速断保护不能保护本线路的全长，而且保护的范围随运行方式和故障类型的变化而变化。

2. 保护范围校验

电流速断保护的灵敏系数通常用保护范围来衡量，保护范围越长，表明保护越灵敏。由图 2.3 可见，最大运行方式下三相短路时，保护范围最大为 $L_{\max}$；最小运行方式下两相短路时，保护范围最小为 $L_{\min}$。保护范围通常用线路全长的百分数表示，一般要求最大保护范围≥50%，最小保护范围≥15%。

电流速断保护的保护范围可通过下面的方法计算，在最大运行方式下（$Z_{\text{S}} = Z_{\text{S}\cdot\min}$），保护范围末端（$L_{\text{k}} = L_{\max}$）发生三相短路时，短路电流 $I_{\text{k}\cdot\max}^{(3)}$ 与动作电流 $I_{\text{set}}^{\text{I}}$ 相等，即

$$I_{\text{k}\cdot\max}^{(3)} = \frac{E_{\text{s}}}{Z_{\text{s.min}} + Z_1 L_{\max}} = I_{\text{set}}^{\text{I}}$$

解之，得

$$L_{\max} = \frac{1}{Z_1}\left(\frac{E_{\text{s}}}{I_{\text{set}}^{\text{I}}} - Z_{\text{s}\cdot\min}\right) \tag{2-5}$$

在最小运行方式下（$Z_{\text{S}} = Z_{\text{S}\cdot\max}$），保护范围末端（$L_{\text{k}} = L_{\min}$）发生两相短路时，短路电流 $I_{\text{k}\cdot\min}^{(2)}$ 与动作电流 I_{OP}^{I} 相等，即

$$I_{\text{k}\cdot\min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{\text{s}}}{Z_{\text{s}\cdot\max} + Z_1 L_{\min}} = I_{\text{set}}^{\text{I}}$$

解之，得

$$L_{\min} = \frac{1}{Z_1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{\text{s}}}{I_{\text{set}}^{\text{I}}} - Z_{\text{s.max}}\right) \tag{2-6}$$

3. 电流速断保护的构成

电流速断保护的单相原理接线如图 2.4 所示。电流继电器 KA 接于电流互感器 TA 的二次侧，当流过它的电流大于它的动作电流后，电流继电器 KA 动作，启动中间继电器 KM，

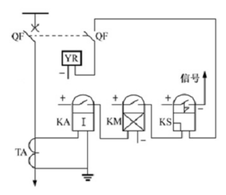


图 2.4 电流速断保护原理接线

KM 触点闭合后，经信号继电器 KS 线圈、断路器辅助触点 QF 接通跳闸线圈 YR，使断路器跳闸。

接入中间继电器 KM 的作用：

(1) 增大触点容量，防止由 KA 触点直接接通跳闸回路时因容量过小而被破坏；

(2) 当线路上装有管型避雷器时，利用中间继电器来增大保护装置的固有动作时间，以防止管型避雷器放电时引起电流速断保护误动作。

信号继电器 KS 的作用是，在整套保护装置动作后，指示并记录该保护的动作，供运行人员查找和分析故障。跳闸回路中接入断路器 QF 的辅助触点 QF，在断路器跳闸时，其辅助触点随之打开，切断跳闸回路电流。否则，由中间继电器的触点切断跳闸回路，将会烧坏中间继电器的触点。

电流速断保护的主要优点是动作迅速、简单可靠。缺点是不能保护线路的全长，且保护范围受系统运行方式和线路结构的影响。当系统运行方式变化很大或被保护线路很短时，甚至没有保护范围。

2.1.3 限时电流速断保护

由于有选择性的电流速断保护不能保护本线路的全长，为快速切除本线路其余部分的短路，应增设第二套保护。为保证选择性和快速性，该保护应与下一线路的电流速断保护在保护范围和动作时限上相配合，即保护范围不超过下一线路电流速断保护的保护范围，动作时限比下一线路电流速断保护高出一个时限级差 Δt 。这种带有一定延时的电流速断保护称为限时电流速断保护。

1. 工作原理与动作电流

现以图 2.5 中的保护 1 为例，来说明限时电流速断保护的整定计算。假设保护 2 装有电流速断保护，其动作电流整定为 $I^{\mathrm{I}}_{\mathrm{set}\cdot 2} = K^{\mathrm{I}}_{\mathrm{rel}} \cdot I^{(3)}_{\mathrm{k3}\cdot\max}$ ，它与最大短路电流变化曲线 1 的交点为 P，这就是它的保护范围。而保护 1 限时电流速断保护的保护范围不能超过保护 2 电流速断保护的保护范围，即 P 点所对应的短路点 k_2 之前，所以在单侧电源供电的情况下，保护 1 的限时电流速断保护的保护范围应在 k_1 点和 k_2 点之间。其原因是若在 k_1 点之前，则不能保护本线路的全长；若在 k_2 点之后，则失去与保护 2 电流速断保护的选择性。所以保护 1 限时电流速断保护的动作电流应整定为 $I^{\mathrm{II}}_{\mathrm{set}\cdot 1} > I^{\mathrm{I}}_{\mathrm{set}\cdot 2}$ ，考虑到各种误差的影响，则有

$$I_{\mathrm{set}\cdot 1}^{\mathrm{II}} = K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}} \cdot I_{\mathrm{set}\cdot 2}^{\mathrm{I}} \tag{2-7}$$

式中，$K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}$——限时电流速断保护的可靠系数，取 1.1～1.2。

2. 动作时限的整定

由图 2.5 可知，保护 1 限时电流速断保护的保护范围已延伸至下一线路电流速断保护的保护范围，为保证选择性，要求限时电流速断保护的动作时限 t_1^{II} 要高于下一线路电流速断保护的动作时限 t_2^{I} 一个时限级差 Δt ，即

$$t_1^{\mathrm{II}} = t_2^{\mathrm{I}} + \Delta t \tag{2-8}$$

对于时限级差 Δt ，从尽快切除故障出发，应越小越好，但为了保证两套保护动作的选择性， Δt 又不能选择过小。影响 Δt 的主要因素有：

(1) 前一级保护动作的负偏差(即保护可能提前动作) Δt_1 。

(2) 后一级保护动作的正偏差(即保护可能延后动作) Δt_2 。

(3) 保护装置的惯性误差(即断路器跳闸时间：从接通跳闸回路到触头间电弧熄灭的时间) Δt_3 。

(4) 为保证有选择性，再加一个时间裕度 $\Delta t_4 = (0.1 \sim 0.15)\mathrm{s}$ ，则时限级差为

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 \tag{2-9}$$

由此确定的 Δt 一般为 0.35s～0.5s，实际应用中取 Δt =0.5s。

保护 1 与保护 2 的配合关系，即保护动作时间与短路点至保护安装处之间距离的关系，用 $t = f(L)$ 来描述，如图 2.5 所示。在保护 2 电流速断保护范围内的短路，将以 t_2^{I} 的时间切除，此时保护 1 的限时电流速断虽然可以启动，但因 t_1^{II} 较 t_2^{I} 大一个 Δt ，而在 QF_2 跳闸后，保护 1 将返回，所以从时间上保证了选择性。若短路发生在保护 1 电流速断保护范围内时，保护 1 将以 t_1^{I} 时间切除，而在该线路其他点短路时，保护 1 将以 t_1^{II} 时间切除。

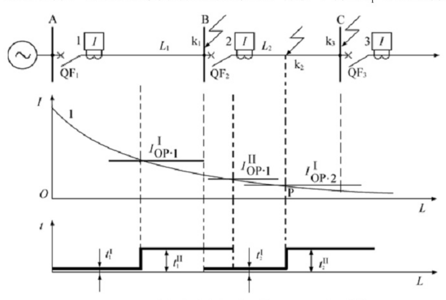


图 2.5　限时电流速度保护工作原理及时限特性

所以，当线路装设电流速断保护和限时电流速断保护后，它们的联合工作就可以保证

在全线路范围内的短路故障都能在 0.5s 时间内予以切除，在一般情况下都能满足速动性的要求。它们的共同作用，构成了线路的主保护，即以最短的时间切除全线路任一点发生的短路。

3. 灵敏系数校验

为了能够保护本线路的全长，限时电流速断保护在系统最小运行方式下线路末端发生两相短路时，应具有足够的灵敏性，一般用灵敏系数来校验，即规程规定

$$K_{\mathrm{sen}}^{\mathrm{II}}=\frac{I_{\mathrm{k.max}}^{(2)}}{I_{\mathrm{set}}^{\mathrm{II}}}=1.3\sim1.5 \qquad (2\text{-}10)$$

式中　$I_{\mathrm{k\cdot min}}^{(2)}$——最小运行方式下被保护线路末端发生两相金属性短路时，流过本线路保护的电流；

$I_{\mathrm{set}}^{\mathrm{II}}$——本线路限时电流速断保护的动作电流。

必须进行灵敏系数校验的原因，主要是考虑下列因素：

(1) 故障点存在过渡电阻，使实际短路电流比计算电流小，不利于保护动作；

(2) 实际的短路电流由于计算误差或其他原因而小于计算值；

(3) 由于电流互感器的负误差，使实际流入保护装置的电流小于计算值；

(4) 继电器实际动作电流比整定电流值高，即存在正误差等；

(5) 考虑一定的裕度。

当灵敏系数不能满足要求时，在保护范围内发生短路时，在上述不利因素的影响下，将导致保护拒动，达不到保护线路全长的目的。这时可采用降低保护动作值的办法来提高灵敏系数，即使之与下级线路的限时电流速断相配合。如保护 1 的动作电流 $I_{\mathrm{set\cdot1}}^{\mathrm{II}}$ 与下一条线路保护 2 的限时电流速断保护的动作电流 $I_{\mathrm{set\cdot2}}^{\mathrm{II}}$ 配合，则

$$I_{\mathrm{set\cdot1}}^{\mathrm{II}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}\cdot I_{\mathrm{set\cdot2}}^{\mathrm{II}} \qquad (2\text{-}11)$$

此时

$$t_1^{\mathrm{II}}=t_2^{\mathrm{II}}+\Delta t=t_2^{\mathrm{I}}+2\Delta t \qquad (2\text{-}12)$$

可见，保护范围的伸长(即灵敏性的提高)，必然导致动作时限的升高。

4. 原理接线图

限时电流速断保护的单线原理接线如图 2.6 所示。其动作过程与图 2.4 所示的电流速断保护基本相同，不同的是用时间继电器 KT 代替了中间继电器 KM。

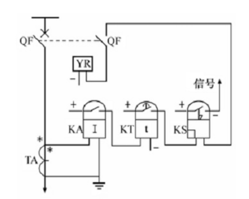


图 2.6　限时电流速断保护单相原理接线

当电流继电器 KA 动作后，需经 KT 建立延时 t^{II} 后才能动作于跳闸。若在 t^{II} 之前故障已被切除，则已经启动的 KA 返回，使 KT 立即返回，整套保护装置不会误动作。

2.1.4　定时限过电流保护

过电流保护通常是指其动作电流按躲过最大负荷电流来整定的保护，它分为两种类型：一种是保护启动后出口的动作时间是固定的整定时间，称为定时限过电流保护；另一种是出口动作时间与过电流的倍数有关，电流越大，出口动作越快，称为反时限过电流保护。本节只介绍定时限过电流保护。

定时限过电流保护(也可简称为过电流保护)在正常运行时，不会动作。当电网发生短路时，则能反应于电流的增大而动作。由于短路电流一般比最大负荷电流大得多，所以保护的灵敏性较高，不仅能保护本线路的全长，作本线路的近后备保护，而且还能保护相邻线路全长，作相邻线路的远后备保护。

1. 工作原理和动作电流

为保证在正常情况下各条线路上的过电流保护绝对不动作，过电流保护的动作电流应大于该线路上可能出现且通过保护装置的最大负荷电流，即 $I_{set}^{III} > I_{L\cdot max}$；同时还必须考虑在外部故障切除后电压恢复时负荷自启动电流作用下保护装置必须能够可靠返回，即返回电流应大于负荷自启动电流。

如图 2.7 所示，当 k 点短路时，保护 1 和保护 2 的过电流保护将同时启动，但根据选择性要求，应由保护 2 动作切除故障，此时保护 1 由于电流已减小应立即返回。而这时通过保护 1 的可能的最大电流不再是正常运行时的最大负荷电流 $I_{L\cdot max}$ 了，这是因为短路时，变电所 B 母线电压降低，接在该母线上的电动机的转速会降低或停转，在故障切除后电压恢复时，电动机将自启动，而电动机的自启动电流要大于它正常工作时的电流。

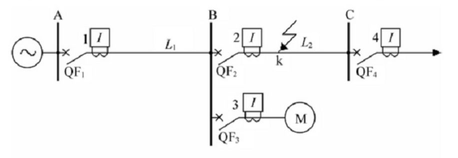


图 2.7　过电流保护动作电流整定说明图

电动机最大自启动电流 $I_{s\cdot max}$ 与正常运行时最大负荷电流 $I_{L\cdot max}$ 的关系为

$$I_{s\cdot max}=K_{ss}\cdot I_{L\cdot max} \tag{2-13}$$

式中　K_{ss}——自启动系数，其数值由负载的性质及电网的具体接线决定，一般取 1.5～3。

为使保护 1 在此电流下能可靠返回，其返回电流应满足关系式 $I_{re}>I_{s\cdot max}$，引入可靠系数则有

$$I_{re}=K_{rel}^{III}\cdot K_{SS}\cdot I_{L\cdot max} \tag{2-14}$$

式中　K_{rel}^{III}——定时限过电流保护的可靠系数，一般取 1.15～1.25；

由电流继电器动作电流与返回电流的关系 $I_{set}=\dfrac{I_{re}}{K_{re}}$，可得过电流保护的动作电流为

$$I_{OP}^{III}=\frac{K_{rel}^{III}\cdot K_{SS}\cdot I_{L\cdot max}}{K_{re}} \tag{2-15}$$

由式(2-15)可知，当返回系数越小时，则过电流保护的动作电流越大，则保护的灵敏性就越差，所以要求继电器的返回系数应尽可能大。

2. 动作时限的整定

如图 2.8 所示的网络，假设各条线路都装有过电流保护，且均按躲过各自的最大负荷电流来整定动作电流。当 k 点短路时，保护 1～4 在短路电流的作用下，都可能启动，为满足选择性要求，应该只有保护 4 动作切除故障，而保护 1～3 在故障切除后应立即返回。如何来满足这个要求，实际中是依靠选择不同的动作时限来保证。

过电流保护的动作时限是按阶梯原则来选择的。从离电源最远的保护开始，如图 2.8 中保护 4 处于电网的末端，只要发生故障，它不需要任何选择性方面的配合，可以瞬时动作切除故障，所以 t_4 只是保护装置本身的固有动作时间，即 $t_4\approx 0\text{s}$。为保证选择性，保护 3 的动作时间 t_3 应比 t_4 高一个时间级差 Δt，即

$$t_3=t_4+\Delta t=0.5\text{s} \tag{2-16}$$

依次类推，可以得到 t_2、t_1。可以看出，保护的动作时间向电源侧逐级增加至少一个 Δt，只有这样才能充分保证动作的选择性。

但必须注意，过电流保护的动作时限在按上述阶梯原则整定的同时，还需要与各线路末端变电所母线上所有出线保护动作时限最长者配合。如图 2.8 中，若保护 5 的动作时间大于保护 3 的动作时间，则保护 2 的动作时间应按 $t_2=t_5+\Delta t$ 来整定。

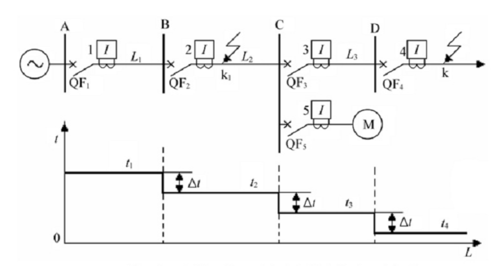


图 2.8　单侧电源辐射形电网过电流保护动作时限选择说明图

3. 灵敏系数校验

过电流保护的灵敏系数校验类似于限时电流速断保护，即

$$K_{\text{sen}}^{\text{III}}=\frac{I_{\text{k}\cdot\min}^{(2)}}{I_{\text{set}}^{\text{III}}} \tag{2-17}$$

当过电流保护作本线路近后备保护时，$I_{\text{k}\cdot\min}^{(2)}$ 取最小运行方式下本线路末端两相金属性短路电流来校验，要求 $K_{\text{sen}}^{\text{III}}\geqslant 1.3\sim1.5$；当过电流保护作相邻线路的远后备保护时，$I_{\text{k}\cdot\min}^{(2)}$ 应取最小运行方式下相邻线路末端两相金属性短路电流来校验，要求 $K_{\text{sen}}^{\text{III}}\geqslant 1.2$ 。

此外应注意，各过电流保护之间还应在灵敏系数上进行配合，即对同一故障点来说，要求靠故障点近的保护，灵敏系数应越高，否则将失去选择性。如图 2.8 中的过电流保护 1 和 2，由于通过同一最大负荷电流，所以动作电流相同，假定为 100A。实际上若保护 2 的电流继电器动作值有正误差，如 105A(一次值)，而保护 1 刚好有负误差，如 95A，那么，当 k_1 点短路时流过保护 1、2 的短路电流为 102A，保护 2 不动作，而保护 1 却要动作，将失去选择性。

对于图 2.8 中的 k 点短路时，要求各过电流保护的灵敏系数应满足如下关系，即

$$K_{\text{sen}\cdot4}^{\text{III}}>K_{\text{sen}\cdot3}^{\text{III}}>K_{\text{senm}\cdot2}^{\text{III}}>K_{sen.1}^{\text{III}} \tag{2-18}$$

在单侧电源的网络接线中，由于越靠近电源端时，负荷电流越大，从而保护装置的整定值越大，而发生故障后，各保护装置均流过同一个短路电流，因此，上述灵敏系数应相互配合的要求是能够满足的。

所以，对于过电流保护，只有在灵敏系数和动作时限都能相互配合时，才能保证选择性。当过电流保护的灵敏系数不能满足要求时，可采用电压启动的电流保护、负序电流保护或距离保护等。

过电流保护的单相原理接线与图 2.6 相同。

2.1.5　阶段式电流保护的应用及评价

1. 阶段式电流保护的构成

无时限电流速断保护、限时电流速断保护和过电流保护都是反应于电流增大而动作的

保护，它们之间的区别主要在于按照不同的原则来整定动作电流。电流速断保护是按照躲开本线路末端的最大短路电流来整定，它虽能无延时动作，但却不能保护本线路全长；限时电流速断保护是按照躲开下级线路各相邻元件电流速断保护的最大动作范围来整定，它虽能保护本线路的全长，却不能作为相邻线路的后备保护；而定时限过电流保护则是按照躲开本线路最大负荷电流来整定，可作为本线路及相邻线路的后备保护，但动作时间较长。

为保证迅速、可靠而有选择性地切除故障，可将这三种电流保护，根据需要组合在一起构成一整套保护，称为阶段式电流保护。

具体应用时，可以采用电流速断保护加定时限过电流保护，或限时电流速断保护加定时限过电流保护，也可以三者同时采用。应用较多的就是三段式电流保护，其各段的动作电流、保护范围和动作时限的配合情况如图 2.9 所示。当被保护线路始端短路时，由第 I 段瞬时切除；该线路末端附近的短路，由第 II 段经 0.5s 延时切除；而第 III 段只起后备作用，所以装有三段式电流保护的线路，一般可在 0.5s 左右时限内切除故障。

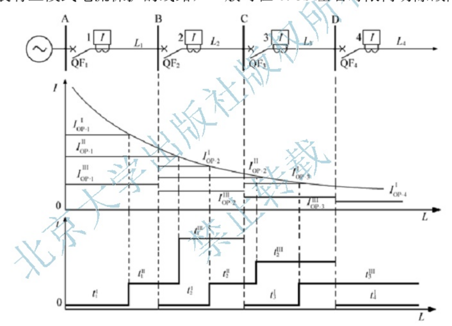


图 2.9　阶段式电流保护的配合说明图

2. 阶段式电流保护的配合

现以图 2.9 为例来说明阶段式电流保护的配合。在电网最末端的线路上，保护 4 采用瞬时动作的过电流保护即可满足要求，其动作电流按躲过本线路最大负荷电流来整定，与电网中其他保护的定值和时限上都没有配合关系。在电网的倒数第二级线路上，保护 3 应首先考虑采用 0.5s 动作的过电流保护；如果在电网中线路 CD 上的故障没有提出瞬时切除的要求，则保护 3 只装设一个 0.5s 动作的过电流保护也是完全允许的；但如果要求线路 CD 上的故障必须快速切除，则可增设一个电流速断保护，此时保护 3 就是一个速断保护加过电流保护的两段式保护。而对于保护 2 和 1，都需要装设三段式电流保护，其过电流保护要和下一级线路的保护进行配合，因此，动作时限应比下一级线路中动作时限最长的再长一个时限级差，一般要整定为 1s～1.5s。所以，越靠近电源端，过电流保护的动作时限就越长。因此，必须装设三段式电流保护。

具有电流速断保护、限时电流速断保护和过电流保护的单相式原理框图如图 2.10 所示。电流速断保护部分由电流元件 KA^{I} 和信号元件 KS^{I} 组成；限时电流速断保护部分由电流元件 KA^{II}、时间元件 KT^{II} 和信号元件 KS^{II} 组成；过电流保护部分则由电流元件 KA^{III}、时间元件 KT^{III} 和信号元件 KS^{III} 组成。由于三段的起动电流和动作时间整定的均不相同，因此，必须分别使用三个串联的电流元件和两个不同时限的时间元件，而信号元件则分别用以发出 I、II、III 段动作的信号。

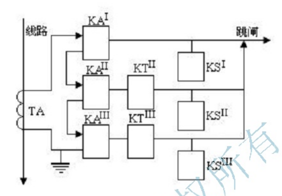


图 2.10　具有三段式电流保护的单相原理框图

目前现场使用的微机型线路保护装置如图 2.11 所示。



图 2.11　微机型线路保护装置

3. 三段式电流保护的评价

对继电保护的评价，主要是从选择性、速动性、灵敏性和可靠性四个方面出发，看其是否满足电力系统安全运行的要求，是否符合有关规程的规定。

1）选择性

在三段式电流保护中，电流速断保护的选择性是靠动作电流来实现的；限时电流速断保护和过电流保护则是靠动作电流和动作时限来实现的。它们在 35kV 及以下的单侧电源辐射形电网中具有明显的选择性，但在多电源网络或单电源环网中，则只有在某些特殊情况下才能满足选择性要求。

2）速动性

电流速断保护以保护固有动作时限动作于跳闸；限时电流速断保护动作时限一般在0.5s以内，因而动作迅速是这两种保护的优点。过电流保护动作时限较长，特别是靠近电源侧的保护动作时限可能长达几秒，这是过电流保护的主要缺点。

3）灵敏性

电流速断保护不能保护本线路全长，且保护范围受系统运行方式的影响较大；限时电流速断保护虽能保护本线路全长，但灵敏性依然要受系统运行方式的影响；过电流保护因按最大负荷电流整定，灵敏性一般能满足要求，但在长距离重负荷线路上，由于负荷电流几乎与短路电流相当，则往往难以满足要求。受系统运行方式影响大、灵敏性差是三段式电流保护的主要缺点。

4）可靠性

由于三段式电流保护中继电器简单，数量少，接线、调试和整定计算都较简便，不易出错，因此，可靠性较高。

总之，使用I段、II段或III段而组成的阶段式电流保护，其最主要的优点就是简单、可靠，并且在一般情况下能满足快速切除故障的要求，因此，在电网中特别是在35kV及以下的单侧电源辐射形电网中得到广泛的应用。其缺点是受电网的接线及电力系统运行方式变化的影响，例如整定值必须按系统最大运行方式来选择，而灵敏性则必须用系统最小运行方式来校验，这就使其灵敏性和保护范围不能满足要求。

4. 三段式电流保护整定计算举例

[例2.1] 如图2.12所示的网络，对保护1进行三段式电流保护整定计算。已知$Z_1 = 0.4\Omega/\text{km}$，$K_{\text{rel}}^{\text{I}} = 1.3$，$K_{\text{rel}}^{\text{II}} = 1.1$，$K_{\text{rel}}^{\text{III}} = 1.2$，$K_{\text{SS}} = 2$，$K_{\text{re}} = 0.85$，$K_{\text{TA}} = 600/5$。

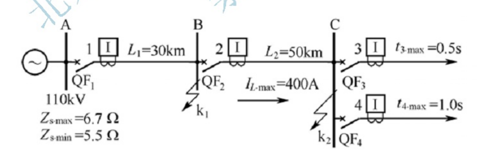


图2.12 例2.1网络图

解：(1) 保护1电流I段整定计算：

① 动作电流$I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}$。按躲过最大运行方式下本线路末端(即$\text{k}_1$点)三相短路时流过保护的最大短路电流来整定，即

$$I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot I_{\text{k1}\cdot\max}^{(3)} = K_{\text{rel}}^{\text{I}} \cdot \frac{E_{\text{S}}}{Z_{\text{s}\cdot\min} + Z_1 L_1} = 1.3 \times \frac{115/\sqrt{3}}{5.5 + 0.4 \times 30} = 4.93\ \text{kA}$$

注：计算时，母线电压应考虑5%的裕量。

采用两相不完全星形接线方式时，流过继电器的动作电流为

$$I_{\text{set}\cdot\text{r}}^{\text{I}}=\frac{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}}{K_{\text{TA}}}=\frac{4.93}{120}=41.08\text{ A}$$

② 动作时限。第 I 段为电流速断，动作时间为保护装置的固有动作时间，即 $t_1^{\text{I}}=0\text{s}$ 。

③ 灵敏系数校验。

在最大运行方式下发生三相短路时的保护范围为

$$L_{\max}=\frac{1}{Z_1}\left(\frac{E_{\text{s}}}{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}}-Z_{\text{S}\cdot\min}\right)=\frac{1}{0.4}\times\left(\frac{115/\sqrt{3}}{4.93}-5.5\right)=20.0\text{ km}$$

则 $$L_{\max}\%=\frac{L_{\max}}{L_1}\times 100\%=\frac{20.0}{30}\times 100\%=66.67\%>50\%$$，满足要求。

在最小运行方式下的保护范围为

$$L_{\min}=\frac{1}{Z_1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{E_{\text{s}}}{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{I}}}-Z_{\text{s}\cdot\max}\right)=\frac{1}{0.4}\times\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{115/\sqrt{3}}{4.93}-6.7\right)=12.41\text{ km}$$

则 $$L_{\min}\%=\frac{L_{\min}}{L_1}\times 100\%=\frac{12.41}{30}\times 100\%=41.37\%>15\%$$，满足要求。

(2) 保护 1 电流 II 段整定计算：

① 动作电流 $I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{II}}$。按与相邻线路保护 I 段动作电流相配合的原则来整定，即

$$I_{\text{set}\cdot 2}^{\text{I}}=1.1\times 1.3\times\frac{115/\sqrt{3}}{5.5+0.4\times(30+50)}=2.53\text{ kA}$$

采用两相不完全星形接线方式时流过继电器的动作电流为

$$I_{\text{set}\cdot\text{r}}^{\text{II}}=\frac{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{II}}}{K_{\text{TA}}}=\frac{2530}{120}=21.08\text{ A}$$

② 动作时限。应比相邻线路保护 I 段动作时限高一个时限级差 Δt ，即

$$t_1^{\text{II}}=t_2^{\text{I}}+\Delta t=0+0.5=0.5\text{s}$$

③ 灵敏系数校验。利用最小运行方式下本线路末端(即 k_1 点)发生两相金属性短路时流过保护的电流来校验灵敏系数，即

$$K_{\text{sen}}^{\text{II}}=\frac{I_{\text{k}_1\cdot\min}^{(2)}}{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{II}}}=\frac{\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{115/\sqrt{3}}{6.7+0.4\times 30}}{2.53}=1.32>1.3$$，满足要求。

(3) 保护 1 电流III段整定计算：

① 动作电流 $I_{\text{set}.1}^{\text{III}}$。按躲过本线路可能流过的最大负荷电流来整定，即

$$I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{III}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}} \cdot K_{\text{ss}}}{K_{\text{re}}} \cdot I_{\text{L}\cdot\max} = \frac{1.2\times 2}{0.85}\times 400 = 1129.42\ \text{A}$$

采用两相不完全星形接线方式时流过继电器的动作电流为

$$I_{\text{set.J}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{set.1}}^{\text{III}}}{K_{\text{TA}}} = \frac{1129.4}{120} = 9.41\text{A}$$

② 动作时限。应比相邻线路保护的最大动作时限高一个时限级差 Δt，即

$$t_1^{\text{III}} = t_{2\cdot\max} + \Delta t = \left(t_{4\cdot\max} + \Delta t\right) + \Delta t = \left(1.0 + 0.5\right) + 0.5 = 2.0\text{s}$$

③ 灵敏系数校验。

作近后备保护时，利用最小运行方式下本线路末端(即 k_1 点)发生两相金属性短路时流过保护装置的电流来校验灵敏系数，即

$$K_{\text{sen}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{k1}\cdot\min}^{(2)}}{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{III}}} = \frac{\dfrac{\sqrt{3}}{2}\times\dfrac{115/\sqrt{3}}{6.7+0.4\times 30}}{1129.4/1000} = 2.72 > 1.5\text{，满足要求。}$$

作远后备保护时，利用最小运行方式下相邻线路末端(即 k_2 点)发生两相金属性短路时流过保护装置的电流来校验灵敏系数，即

$$K_{\text{sen}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{k2}\cdot\min}^{(2)}}{I_{\text{set}\cdot 1}^{\text{III}}} = \frac{\dfrac{\sqrt{3}}{2}\times\dfrac{115/\sqrt{3}}{6.7+0.4\times\left(30+50\right)}}{1129.4/1000} = 1.32 > 1.2\text{，满足要求。}$$

2.1.6 电流保护的接线方式

1. 电流保护的接线方式

电流保护的接线方式是指保护中电流继电器与电流互感器二次绕组之间的连接方式。对于相间短路的电流保护，主要有三种接线方式：三相三继电器的完全星形接线，两相两继电器的不完全星形接线，两相一继电器的两相电流差接线。

1）三相三继电器的完全星形接线

三相三继电器的完全星形接线如图 2.13 所示。

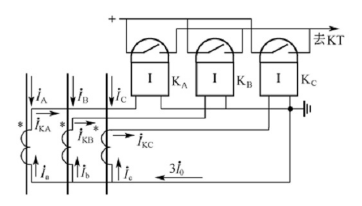


图 2.13 三相三继电器完全星形接线

它是将三个电流互感器与三个电流继电器分别按相连接在一起，互感器和继电器均接

成星形。三个继电器的触点并联连接，继电器线圈中的电流就是互感器的二次电流。在中线上流回的电流为

$$3I_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \tag{2-19}$$

正常时，三相平衡，$3I_0 = 0$。当系统发生非对称接地故障时或发生相间短路时，三相电流不对称，$3I_0$ 大幅增加，使继电器动作。因继电器的触点是并联的，其中任何一个触点动作均可动作于跳闸或使时间继电器启动，所以可靠性和灵敏性较高；又由于在每相上均装有电流继电器，所以它可以反应各种相间短路和中性点直接接地电网中的单相接地短路。所以它主要用于中性点直接接地电网中进行各种相间短路保护和单相接地短路保护。

2）两相两继电器的不完全星形接线

两相两继电器的不完全星形接线(也称 V 形接线或两相星形接线)如图 2.14 所示，与完全星形接线相比，就是在 B 相上不装设电流互感器和电流继电器(设备相对少了)，所以不能反应 B 相中流过的电流(不能完全反应系统的单相接地故障)。这种接线方式中，中性线中流回的电流为 $\dot{I}_a + \dot{I}_c$，所以可以反应各种类型的相间短路(其触点也是并联的)。由于这种接线方式较为简单、经济，所以在中性点直接接地电网和中性点非直接接地电网中，广泛作为相间短路保护的接线方式。

当采用以上两种接线方式时，流入继电器的电流 I_K 就是互感器的二次电流 I_2，设电流互感器的变比为 $n_1 = I_1 / I_2$，则 $I_K = I_2 = I_1 / n_1$。因此，当保护装置的起动电流整定为 I_{op} 时，则反应到继电器上的起动电流即应为

$$I_{KA \cdot set} = \frac{I_{set}}{n_1} \tag{2-20}$$

3）两相一继电器的两相电流差接线

两相一继电器的两相电流差接线如图 2.15 所示，流过电流继电器的电流为 $\dot{I}_{KA} = \dot{I}_a - \dot{I}_c$ 即两相电流之差。它有三种情况：在对称运行和三相短路时，$I_{KA} = \sqrt{3} I_a = \sqrt{3} I_c$；在 A、C 两相短路时，$I_{KA} = 2I_a$；在 AB 或 BC 两相短路时，$I_{KA} = I_a$ 或 $I_{KA} = I_c$。所以在不同类型的短路情况下，流过继电器中的电流 I_{KA} 与互感器的二次电流 I_{II} 之比是不同的，为了表征二者的关系，在保护装置整定计算中引入一个接线系数 K_{con}，其定义为流过电流继电器的电流 I_{KA} 与电流互感器二次电流 I_{II} 之比，即

$$K_{con} = \frac{I_{KA}}{I_{II}} \tag{2-21}$$

由此式可知，在完全星形接线和不完全星形接线中，$K_{con} = 1$，而在两相电流差接线中，对于不同的故障，其数值不同，三相短路时，$K_{con} = \sqrt{3}$，A、C 两相短路时 $K_{con} = 2$，AB 或 BC 两相短路时，$K_{con} = 1$。因为接线系数在不同的故障时不同，所以保护装置的灵敏度也

不相同，但所用设备少，简单、经济，所以主要用于低压线路保护和电动机保护中灵敏度较易满足的场合。

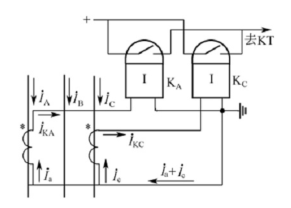


图 2.14 两相两继电器不完全星形接线

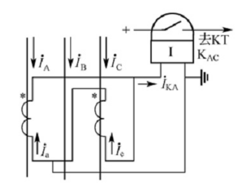


图 2.15 两相一继电器的两相电流差接线

2. 各种接线方式在不同故障时的性能分析

1）对中性点直接接地电网和非直接接地电网中的各种相间短路

前面所述三种接线方式均能正确反应这些故障（除两相电流差接线不能保护变压器外），不同之处仅在于动作的继电器数目不一样，三相星形接线方式在各种两相短路时，均有两个继电器动作，而两相星形接线方式在 AB 和 BC 相间短路时只有一个继电器动作。所以对不同类型和相别的相间短路，各种接线方式的保护装置的灵敏度有所不同。

2）对中性点非直接接地电网中的两点接地短路

由于中性点非直接接地电网中（不包括中性点经小电阻接地的电网），允许单相接地时继续短时运行，因此，希望只切除一个故障点。

例如，在图 2.16 所示的串联线路上发生两点接地短路时，希望只切除距电源较远的那条线路 BC，而不要切除线路 AB，因为这样可以继续保证对变电所 B 的供电。当保护 1 和 2 均采用三相星形接线时，由于两个保护之间在定值和时限上都是按照选择性的要求配合整定的，因此，就能够保证 100%地只切除线路 BC。而如果是采用两相星形接线，则当线路 BC 上有一点是 B 相接地时，则保护 1 就不能动作，此时，只能由保护 2 动作切除线路 AB，因而扩大了停电范围，由此可见，这种接地方式在不同相别的两点接地组合中，只能保证有 2/3 的机会有选择性地切除后面一条线路。

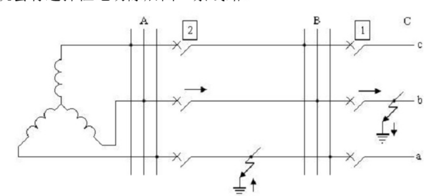


图 2.16 串联线路上两点接地示意图

又如图 2.17 所示，在变电所引出的放射形线路上，发生两点接地短路时，希望任意切

除一条线路即可。当保护 1 和 2 均采用三相星形接线时，两套保护均将起动，如保护 1 和保护 2 的时限整定得相同，即 $t_1 = t_2$，则保护 1 和 2 将同时动作切除两条线路，因此，不必要的切除两条线路的机会就比较多了。如果采用两相星形接线，即使是出现 $t_1 = t_2$ 的情况，它也能保证有 2/3 的机会只切除任一条线路，这是因为只要某一条线路上具有 B 相一点接地，由于 B 相未装保护，因此，该线路就不被切除。表 2-1 说明了在两条线路上两相两点接地的各种组合时，保护的动作情况。

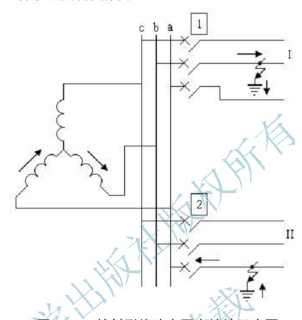


图 2.17　放射形线路上两点接地示意图

表 2-1　图 2.16 中不同线路上两点接地时，两相式保护动作情况的分析

线路 I 故障相别	A	A	B	B	C	C
线路 II 故障相别	B	C	A	C	A	B
保护 1 动作情况	+	+	−	−	+	+
保护 2 动作情况	−	+	+	+	+	−
$t_1 = t_2$ 时，停电线路数	1	2	1	1	2	1

注：“+”表示动作；“−”表示不动作。

3）对 Y，d 接线变压器后面的两相短路

当 Y，d11 接线的升压变压器高压（Y）侧 BC 两相短路时，在低压（△）侧各相的电流为 $\dot{I}_A^{\Delta} = \dot{I}_C^{\Delta}$ 和 $\dot{I}_B^{\Delta} = -2\dot{I}_A^{\Delta}$；而当 Y，d11 接线的变压器低压（△）侧 AB 两相短路时，在高压（Y）侧各相的电流也具有同样的关系，即 $\dot{I}_A^{Y} = \dot{I}_C^{Y}$ 和 $\dot{I}_B^{Y} = -2\dot{I}_A^{Y}$。

现以图 2.18（a）所示的 Y，d11 接线的降压变压器为例，分析三角形侧发生 AB 两相短路时的电流关系。在故障点，$\dot{I}_A^{\Delta} = -\dot{I}_B^{\Delta}$，$\dot{I}_C^{\Delta} = 0$，设△侧各相绕组中的电流分别为 $\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$ 和 $\dot{I}_c$，则

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_a-\dot{I}_b&=\dot{I}_A^{\Delta}\\ \dot{I}_b-\dot{I}_c&=\dot{I}_B^{\Delta}\\ \dot{I}_c-\dot{I}_a&=\dot{I}_C^{\Delta}\end{aligned}\right\}\qquad(2\text{-}22)$$

由于$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$，由此可计算出

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_a&=\dot{I}_c=\frac{1}{3}\dot{I}_A^{\Delta}\\ \dot{I}_b&=-\frac{2}{3}\dot{I}_A^{\Delta}=\frac{2}{3}\dot{I}_B^{\Delta}\end{aligned}\right\}\qquad(2\text{-}23)$$

根据变压器的工作原理，即可计算得星形侧电流的关系为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_A^{Y}&=\dot{I}_C^{Y}\\ \dot{I}_B^{Y}&=-2\dot{I}_A^{Y}\end{aligned}\right\}\qquad(2\text{-}24)$$

图 2.18（b）为按规定的电流正方向画出的电流分布图，图 2.18（c）为三角形侧的电流矢量图，图 2.18（d）为星形侧的电流矢量图。

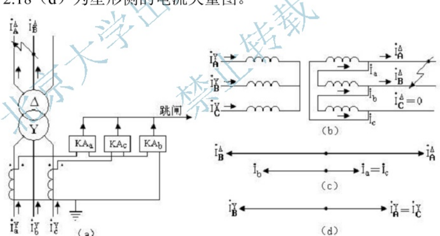


图 2.18 Y，d11 接线降压变压器两相短路时的电流分布及过电流保护的接线图

（a）接线图；（b）电流分布图；（c）△侧电流相量图；（d）Y 侧电流相量图

当过电流保护接于降压变压器的高压侧以作为低压侧线路故障的后备保护时，如果保护是采用三相星形接线，则接于 B 相上的继电器由于流有较其它两相大一倍的电流，因此，灵敏系数增大一倍，这是十分有利的。如果保护采用的是两相星形接线，则由于 B 相上没有装设继电器，因此，灵敏系数只能由 A 相和 C 相的电流决定，在同样的情况下，其数值要比采用三相星形接线时降低一半。为了克服这个缺点，可以在两相星形接线的中线上再接入一个继电器，如图 2.18（a）所示，其中流过的电流为$\left(\dot{I}_A^{Y}+\dot{I}_C^{Y}\right)/n_1$，即为电流$\dot{I}_B^{Y}/n_1$，

因此，利用这个继电器就能提高灵敏系数。

4）三种接线方式的经济性

三相星形接线需要 3 个电流互感器、3 个电流继电器和 4 根二次电缆，相对来讲是复杂和不经济的。

根据以上的分析和比较，三种接线方式的使用情况如下。

三相星形接线广泛应用于发电机、变压器等大型贵重电气设备的保护中，因为它能提高保护动作的可靠性和灵敏性。此外，它也可以用在中性点直接接地电网中，作为相间短路和单相接地短路的保护。但是实际上，由于单相接地短路都是采用专门的零序电流保护，因此，为了上述目的而采用三相星形接线方式的并不多。

由于两相星形接线较为简单经济，因此，在中性点直接接地电网和非直接接地电网中，都是广泛地采用它作为相间短路的保护。此外在分布很广的中性点非直接接地电网中，两点接地短路发生在图 2.16 所示线路上的可能性，要比图 2.15 的可能性大得多。在这种情况下，采用两相星形接线就可以保证有 2/3 的机会只切除一条线路，这一点比之用三相星形接线是有优越性的。当电网中的电流保护采用两相星形接线方式时，应在所有的线路上将保护装置安装在相同的两相上（一般都装在 A、C 相上），以保证在不同线路上发生两点及多点接地时，能切除故障。

两相电流差接线方式具有接线简单、投资少等优点，但是灵敏性较差，又不能保护 Y，d11 接线变压器后面的短路，故在实际应用中很少用来作为配电线路的保护。这种接线主要用在 6～10kV 中性点不接地系统中，作为馈电线和较小容量高压电动机的保护。

3. 三段式电流保护装置接线图

电力系统继电保护的接线图一般有框图、原理图和安装图三种。对于采用机电型继电器构成的继电保护装置，用得最多的是原理图。原理图又分为归总式原理图(简称原理图)和展开式原理图(简称展开图)。

原理图能展示出保护装置的全部组成元件及其之间的联系和动作原理。在原理图上所有元件都以完整的图形符号表示，所以能对整套保护装置的构成和工作原理给出直观、完整的概念，易于阅读。三段式电流保护的原理接线图如图 2.18(a)所示。图中的保护采用不完全星形接线方式(因为是相间短路保护)，可实现各种类型的相间短路保护。

第 I 段电流保护由电流继电器 KA_1、KA_2、中间继电器 KM 和信号继电器 KS_1 组成。第 II 段电流保护由电流继电器 KA_3、KA_4、时间继电器 KT_1 及信号继电器 KS_2 组成。第 III 段电流保护由电流继电器 KA_5、KA_6、KA_7、时间继电器 KT_2 及信号继电器 KS_3 组成。其中，电流继电器 KA_7 接于 A、C 两相电流之和的中性线上，相当于 B 相继电器，则第 III 段电流保护组成了三相式保护。

之所以要组成三相式保护，是因为第 III 段电流保护要作为相邻变压器的远后备保护。由于变压器电抗较大，使后备保护灵敏度常常不能满足要求，而第 III 段电流保护采用三相式保护能提高保护的灵敏度。

由于三段式电流保护的各段均设有信号继电器，因此，任一段保护动作于断路器跳闸

的同时，均有相应的信号继电器掉牌，并发出信号，以便了解是哪一段动作，宜于进行分析。各段保护均独立工作，且可通过连接片 XB 投入或停用。

由图 2.19(a)可知，原理图只给出保护装置的主要元件的工作原理，但元件的内部接线、回路标号、引出端子等均未表示出来。特别是元件较多、接线复杂时，原理图的绘制和阅读都比较困难，且不便于查线和调试、分析等工作，所以现场广泛使用展开图。

展开图是将交流回路和直流回路分开画出的。各继电器的线圈和触点分别画在各自所属的回路中，并用相同的文字符号标注，以便阅读和查对。在连接上按照保护的动作顺序，自上而下、从左到右依次排列线圈和触点。

三段式电流保护的展开图如图 2.19(b)、图 2.19(c)所示。

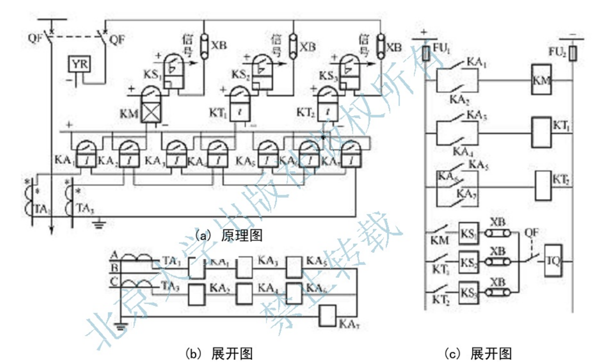


图 2.19　三段式电流保护原理接线图

阅读展开图时，一般应按先交流后直流，由上而下、从左至右的顺序阅读。展开图的接线简单，层次清楚，绘制和阅读都比较方便，且便于查线和调试，特别是对于复杂的保护，其优越性更加显著，所以在生产中得到了广泛的应用。

图中继电器触点的位置，对应于被保护线路的正常工作状态。

2.2　电网相间短路的方向性电流保护

对于单电源辐射形供电的网络，每条线路上只在电源侧装设保护装置就可以了。当线路发生故障时，只要相应的保护装置动作于断路器跳闸，便可以将故障元件与其他元件断开，但却要造成一部分变电所停电。为了提高电网供电的可靠性，在电力系统中多采用双侧电源供电的辐射形电网或单侧电源环形电网供电。此时，采用阶段式电流保护将难以满足选择性要求，应采用方向性电流保护。本节主要介绍方向性电流保护的工作原理、整定计算、方向继电器及其接线方式等内容。

2.2.1　方向性电流保护的工作原理

1. 方向电流保护的基本原理

对于如图 2.20 所示的双侧电源网络，由于两侧都有电源，所以在每条线路的两侧均需装设断路器和保护装置。当线路上发生相间短路时，应跳开故障线路两则的断路器，而非故障线路仍能继续运行。例如，当 k_1 点发生短路时，应由保护 3、4 动作跳开断路器切除故障，而其他线路不会造成停电，这正是双侧电源供电的优点。但是单靠电流的幅值大小能否保证保护 2、5 不误动作，由图 2.20 可知，当 k_1 点短路时，由左侧电源提供的短路电流

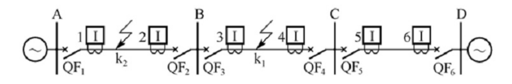


图 2.20　双侧电源网络

同时流过保护 2 和保护 3，使保护 3 的电流速断保护启动，跳开 QF_3。如果此短路电流也大于保护 2 的电流速断保护的整定值，则保护 2 可能在保护 3 跳开 QF_3 之前或同时跳开 QF_2，这样保护 2 的动作将失去选择性。同时给动作值的整定带来麻烦。又如对于定时限过电流保护，为满足选择性要求，在 k_1 点短路时，要求保护 2 大于保护 3 的动作时限；在 k_2 点短路时，又要求保护 2 小于保护 3 的动作时限，给保护动作时限的整定造成困难。同理，对于单侧电源环网也会出现这样的问题。

为解决上述问题，引入短路功率方向的概念：短路电流方向由母线流向线路称为正方向故障，允许保护动作；短路电流方向由线路流向母线称为反方向故障，不允许保护动作。如当 k_1 点短路时，流过保护 3 的短路功率方向由母线流向线路，保护应该动作；而流过保护 2 的短路功率方向则由线路流向母线，保护不应该动作。同样对于 k_2 点短路，流过保护 2 的短路功率方向由母线流向线路，保护应该动作；而流过保护 3 的则由线路流向母线，保护不应动作。

所以，只要在电流保护的基础上加装一个能判断短路功率流向的方向元件，即功率方向元件，并且只有当短路功率由母线流向线路时才允许动作，而由线路流向母线时则不允许动作，从而使保护的动作具有一定的方向性。这样就可以解决反方向短路保护误动作的问题。这种在电流保护的基础上加装方向元件的保护称为方向电流保护。方向电流保护既利用了电流的幅值特征，又利用了短路功率的方向特征。

在图 2.21 所示的电网中，各电流保护均加装了方向元件构成了方向电流保护，图中箭头方向为各保护的动作方向。把同一方向的保护如 1、3、5 作为一组，保护 2、4、6 为另一组，这样就可将两个方向上的保护拆开成两个单电源辐射形电网的保护。当 k_2 点短路时，流经保护 1、3、5 的短路功率方向均由母线流向线路，与保护的动作方向相同，此时只需考虑保护 1、3、5 之间的动作电流和动作时限的配合即可，方法与上一节所述的单电源辐射形电网的阶段式保护相同。而流经保护 2、4 的短路功率方向均由线路流向母线，与保护的动作方向相反，保护不会动作，也就不需要考虑与保护 1、3、5 之间的整定配合。同理，其他各点短路时，动作方向相反的保护均不会误动作。

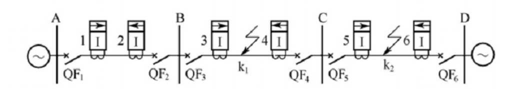


图 2.21 双侧电源网络的方向性电流保护原理说明图

2. 方向过电流保护的单相原理接线

具有方向性的过电流保护的单相原理接线如图 2.21 所示，与图 2.6 所示的限时电流速断保护单相原理接线图相比，只是多了一个用作判断短路功率方向(即故障方向)的功率方向元件。由图 2.22 可知，电流元件和方向元件的触点是串联的，它们必须都启动后，才能去启动时间元件，经预定的延时后动作于跳闸。

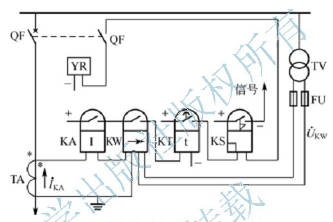


图 2.22 方向电流保护单相原理接线图

需要说明的是，对于双侧电源辐射形电网或单侧电源环网中的电流保护，在某些情况下不需要方向元件同样可以实现动作的选择性，但必须通过比较保护之间的整定值和动作时限的大小来实现，这样有利于简化保护的接线，提高动作的可靠性。

对于电流速断保护，如图 2.20 中保护 3，当其背后 k_2 点发生相间短路时，流过它的最大短路电流小于其动作电流时，即 $I_{k2} < I_{set\cdot 3}^{I}$，则保护 3 的电流速断不会误动作，这样保护 3 就可以不装方向元件。采用同样方法可确定其他电流速断保护是否应装设方向元件。

对于过电流保护，可通过比较同一母线两侧保护的动作时限来决定是否采用方向元件。如图 2.20 中保护 2 的动作时限若小于保护 3 的动作时限，即 $t_2^{III} < t_3^{III}$，当 k_2 点短路时，保护 2 先于保护 3 动作跳闸，因此，保护 3 可不装方向元件，而保护 2 则必须装设方向元件。

对于限时电流速断保护，则必须综合考虑以上两种因素。

2.2.2 功率方向判别元件

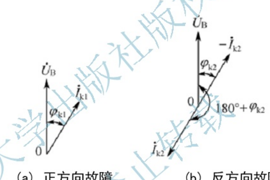
功率方向判别元件是用来判断短路功率方向的，是方向电流保护中的主要元件。所以它必须具有足够的灵敏性和明确的方向性，即发生正方向故障(短路功率由母线流向线路)时，能可靠动作，而在发生反方向故障(短路功率由线路流向母线)时，可靠不动作。

1. 功率方向元件的工作原理

功率方向元件是通过测量保护安装处的电压和电流之间的相位关系来判断短路功率方

向的。以图 2.20 所示网络为例，规定电流由母线流向线路为正，电压以母线高于大地为正。当 k_1 点发生三相短路时，流过保护 3 的电流 $\dot{I}_{k1}$ 为正向电流，它与母线 B 上的电压 $\dot{U}_B$ 之间的夹角为线路的阻抗角 φ_{k1}，其值的变化范围为 $0° < \varphi_{k1} < 90°$，且电压超前电流(因为线路主要以感性为主)，则短路功率为 $P_k = U_B I_{k1} \cos\varphi_{k1} > 0$。而当 k_2 点三相短路时，流过保护 3 的电流为反向电流 $-\dot{I}_{k2}$，它滞后母线电压 $\dot{U}_B$ 的角度为线路阻抗角 φ_{k2}，则 $\dot{I}_{k2}$ 滞后 $\dot{U}_B$ 的相位角为 $180° + \varphi_{k2}$，此时短路功率为 $P_k = U_B I_{k2} \cos(180° + \varphi_{k2}) < 0$。其电压、电流的相位关系如图 2.23 所示。

由图 2.23 可知，正方向短路时，$\dot{U}_B$ 超前 $\dot{I}_k$ 的角度为锐角，反方向短路时，$\dot{U}_B$ 超前 $\dot{I}_k$ 的角度为钝角。因此，功率方向元件的工作原理实际上就是通过测量 $\dot{U}_B$ 和 $\dot{I}_k$ 之间的相位角来判别正、反方向短路的，正方向短路时，功率方向元件动作，反方向短路时，功率方向元件不动作。



(a) 正方向故障　　(b) 反方向故障

图 2.23 正反向故障时电压与电流的相位关系

2. 功率方向元件的动作区域

设 $\varphi_{KW} = \arg\dfrac{\dot{U}_{KW}}{\dot{I}_{KW}}$，称为功率方向元件的测量角度，即 $\dot{U}_{KW}$ 超前 $\dot{I}_{KW}$ 的角度(若为负角，则 $\dot{I}_{KW}$ 超前 $\dot{U}_{KW}$)。设 $\alpha = \varphi_u - \varphi_I$，称为功率方向元件的内角，它与结构有关，则有

$$\varphi_1 = -90° - (\varphi_u - \varphi_I) = -90° - \alpha \tag{2-25}$$

称为功率方向元件的最小动作角；

$$\varphi_2 = 90° - (\varphi_u - \varphi_I) = 90° - \alpha \tag{2-26}$$

称为功率方向元件的最大动作角。

所以，功率方向元件的动作条件又可表示为

$$\varphi_1 \leqslant \varphi_{KW} \leqslant \varphi_2 \tag{2-27}$$

即测量角在动作角范围内，继电器动作，否则不动作。

以 $\dot{I}_{KW}$ 为参考相量，画出其相位关系(以 $\dot{U}_{KW}$ 为参考相量，画法一样，将 $\dot{U}_{KW}$ 转到 $\dot{I}_{KW}$

位置即可)。先画出 $\dot{I}_{\text{KW}}$（角度逆时针方向为正），$\varphi_1 = -90° - \alpha$ 为最小动作角，其一个边构成动作的下边界；$\varphi_2 = 90° - \alpha$ 为最大动作角，其一个边构成动作的上边界。而动作范围为 $\varphi_2 - \varphi_1 = (90° - \alpha) - (-90° - \alpha) = 180°$，所以，上、下边界在一条直线上，称这条直线为动作分界线，将整个区域分为动作区和非动作区。当 $\dot{U}_{\text{KW}}$ 位于该分界线的右下侧时，方向元件动作，位于左上侧时方向元件不动作，如图 2.24 所示。

3）功率方向元件的最大灵敏角

当 $\varphi_{\text{KW}} = \arg\dfrac{\dot{U}_{\text{KW}}}{\dot{I}_{\text{KW}}} = -\alpha = -(\varphi_{\text{u}} - \varphi_{\text{I}}) = \varphi_{\text{I}} - \varphi_{\text{u}}$ 或 $\varphi_{\text{u}} = \varphi_{\text{I}} + \alpha = 90°$ 或 $\varphi_{\text{I}} = \varphi_{\text{u}} - \alpha$，而 φ_{I} 是 $\dot{K}_{\text{I}}\dot{I}_{\text{KW}}$ 超前 $\dot{I}_{\text{KW}}$ 的相位角，φ_{u} 是 $\dot{K}_{\text{U}}\dot{U}_{\text{KW}}$ 超前 $\dot{U}_{\text{KW}}$ 的相位角，所以，$\dot{K}_{\text{U}}\dot{U}_{\text{KW}}$ 与 $\dot{K}_{\text{I}}\dot{I}_{\text{KW}}$ 此时同相位，如图 2.25 所示，此时工作量 $\dot{A}$ 最大，而制动量 $\dot{B}$ 最小，功率方向元件动作最灵敏。所以，将 $\varphi_{\text{KW}} = -\alpha$ 称为功率方向元件的最大灵敏角，用 φ_{sen} 表示，即 $\varphi_{\text{sen}} = -\alpha$，将 $\varphi_{\text{KW}} = \varphi_{\text{sen}}$ 时的 $\dot{U}_{\text{KW}}$ 相量绘入图 2.24 中，则与 $\dot{U}_{\text{KW}}$ 重叠的射线称为最大灵敏线，该灵敏线就是垂直于动作边界的射线，其意义：以电流 $\dot{I}_{\text{KW}}$（或电压 $\dot{U}_{\text{KWJ}}$）为参考相量的情况下，当 $\dot{U}_{\text{KW}}$（$\dot{I}_{\text{KW}}$）落到最大灵敏线上时，功率方向元件动作最灵敏，如果远离，则灵敏度下降。

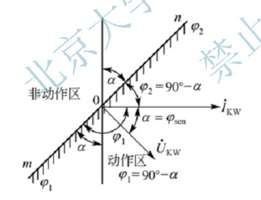


图 2.24 功率方向元件的动作区域

图 2.25 $\varphi_{\text{KW}} = -\alpha$ 时各电压相量间的关系

4）灵敏角与动作角的关系

将式(2-25)与式(2-26)相加得

$$\varphi_1 + \varphi_2 = -2\alpha \tag{2-28}$$

将 $\varphi_{\text{sen}} = -\alpha$ 代入上式，并整理后，可得

$$\varphi_{\text{sen}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \tag{2-29}$$

将 $\varphi_{\text{sen}} = -\alpha$ 代入式(2-25)和式(2-26)中并整理后，可得

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{sen}} - 90° \tag{2-30}$$

$$\varphi_2 = \varphi_{sen} + 90^\circ \tag{2-31}$$

2.2.3 相间短路功率方向元件的接线方式

功率方向元件是通过测量保护安装处的电压和电流之间的相位关系来判别短路功率方向的，所以它必须同时输入母线电压和线路电流。而功率方向元件的接线方式就是指它与电压互感器和电流互感器之间的连接方式。在考虑接线方式时，应满足以下要求：

(1) 必须保证功率方向元件具有良好的方向性，即正方向发生任何类型的相间短路故障都能动作，而反方向短路时则不动作。

(2) 尽量使功率方向元件在正向短路时具有较高的灵敏性，即短路时加入继电器的电压 $\dot{U}_{KW}$ 和电流 $\dot{I}_{KW}$ 的数值足够大，并使 φ_{KW} 尽可能接近于最大灵敏角 φ_{sen} 。

1. 功率方向元件的90°接线方式

为满足功率方向元件接线方式的要求，目前功率方向元件广泛采用的是90°接线方式。所谓90°接线方式是指在三相对称且功率因数 $\cos\varphi = 1$ 的情况下，各功率方向元件所加电流 $\dot{I}_{KW}$ 和电压 $\dot{U}_{KW}$ 的相位刚好相差90°，也称非故障相相间电压的接线方式。如当取 $\dot{I}_{KW} = \dot{I}_a$ ，$\dot{U}_{KW} = \dot{U}_{bc}$ 时，其相位关系如图 2.26 所示。

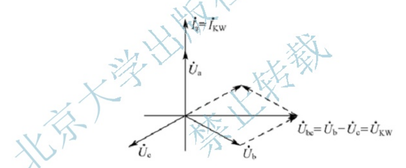


图 2.26 90°接线方式中电流、电压相位关系

之所以要采用90°接线方式是因为在中性点不接地系统中，中性点对地电位是不固定的，则各相对地电压(相电压)难以确切地反应相间短路情况，而线电压却能直接反应相间短路。所以，相间短路保护的功率方向元件输入的是线电压。当输入线电压时，在保护安装处附近发生两相短路时，故障相的相间电压(线电压)接近于0，则功率方向元件将拒动。对于可能出现这种情况的区域，称为方向继电器的电压死区。所以，为了尽可能避免两相短路时的电压死区，则采用非故障相相间电压的接线方法。输入三相功率方向元件的电流 $\dot{I}_{KW}$ 和电压 $\dot{U}_{KW}$ 的关系如表 2-2 所示。

表 2-2　90°接线方式各功率方向元件输入电流和电压

相　　别	$\dot{I}_{KW}$	$\dot{U}_{KW}$

A B C	$\dot{I}_a$ $\dot{I}_b$ $\dot{I}_c$	$\dot{U}_{bc}$ $\dot{U}_{ca}$ $\dot{U}_{ab}$

在短路时，这些值都很大，可使方向继电器正确灵敏地动作，它保证了两相短路时无电压死区。但当母线附近发生了三相短路时，三个线电压均接近于0，则存在电压死区。所以，应该最大限度地减小三相短路时的电压死区。

2. 方向过电流保护的原理接线

方向过电流保护的原理接线和展开图如图 2.27 所示，其中三个功率方向元件的接线即为90°接线方式。在接入电流、电压时要特别注意电流线圈和电压线图的极性端。在实际应用中，如果有一个线圈极性接错，则会出现正方向短路时拒动，而反方向短路时误动的严重后果。所以，90°接线方式的接线不仅要考虑继电器的电流、电压应如何接入，还需要注意怎么样接的问题。

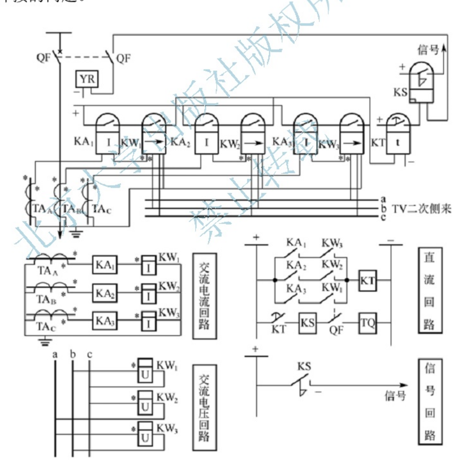
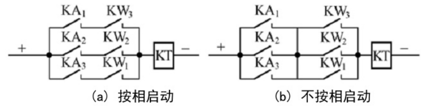


图 2.27 方向过电流保护原理接线图

3. 按相启动接线

按相启动接线是指同名相(如 A 相)的电流元件触点 KA_1 与功率方向元件的触点 KW_1 直接串联，构成“与”门后再三相并联，然后再接入时间元件 KT 的线圈，如图 2.28(a)所示。这种按相启动接线方式能够保证在反方向发生不对称短路时，因非故障相电流元件不

会动作，所以保护不会误启动。若不采用按相启动接线，如图 2.28(b)所示，则故障相电流将通过非故障相的功率方向元件启动时间继电器，造成保护的误动作。所以，要采用按相启动接线，否则会使保护误动作。



(a) 按相启动　　(b) 不按相启动

图 2.28　方向电流保护的启动方式

4. 功率方向元件测量角度的变化范围

下面分析采用 90° 接线方式时功率方向元件在各种相间短路时测量角度 φ_{KW} 的变化范围，进而得出此种接线方式下功率方向元件的最大灵敏角的取值。

1）三相对称短路

当发生三相对称短路时，三只方向继电器的工作情况是相同的，所以只分析一相即可。当采用 90°接线方式时，KW_1 输入的电流是 $\dot{I}_{KW}=\dot{I}_a$，输入的电压是 $\dot{U}_{KW}=\dot{U}_{bc}$。当发生三相对称短路时，各量的关系如图 2.29 所示，三个相电压仍然对称，$\dot{I}_{KW}$ 根据保护安装处至故障点之间的线路阻抗角 φ_L 来确定。由图 2.29 可知：$\varphi_{KW}=-(90°-\varphi_L)$，(负号表示电流超前电压)。当故障点距保护安装处很近时，$\varphi_L\approx 0°$，当故障点距保护安装处很远时，$\varphi_L\approx 90°$，即 $0°\leqslant\varphi_L\leqslant 90°$，所以，$\varphi_{KW}$ 的变化范围为

$$-90°\leqslant\varphi_{KW}\leqslant 0° \tag{2-32}$$

因为 $\varphi_{KW}=\varphi_{sen}=-\alpha$ 时，功率方向元件动作最灵敏，所以能使其动作的内角 α 的取值范围为

$$0°\leqslant\alpha\leqslant 90° \tag{2-33}$$

即在正向三相短路时，只要选择 $0°\leqslant\alpha\leqslant 90°$ 的功率方向元件均可以动作。

为了使功率方向元件器具有较高的灵敏性，希望其在三相短路时尽可能工作在最灵敏的状态，即 $\varphi_{KW}=\varphi_{sen}=-\alpha$，因此，元件动作最灵敏的条件是 $\alpha=90°-\varphi_L$。

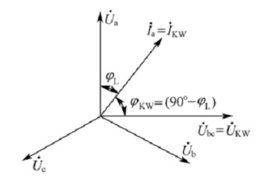


图 2.29 三相短路时保护安装处电压、电流相量图

例如，当$\varphi_L = 68°$时，则$\alpha = 90° - 68° = 22°$，实选$\alpha = 30°$的功率方向元件，可使功率方向元件工作在最大灵敏线附近，使其动作最灵敏，使三相短路时的电压死区最小。

2）两相短路

以B、C相短路为例，有以下两种情况。

(1) 短路点位于保护安装处附近。

设系统三相电势$\dot{E}_a$、$\dot{E}_b$、$\dot{E}_c$是对称的，如图2.30所示。

因为B、C相短路，且短路点距保护安装处较近，则有$\dot{U}_a = \dot{E}_a$，$\dot{U}_b = \dot{U}_c = -\frac{1}{2}\dot{E}_a$，所以有$\dot{U}_{ab} = \frac{3}{2}\dot{E}_a$，$\dot{U}_{bc} = 0$，$\dot{U}_{ca} = -\frac{3}{2}\dot{E}_a$。

对A相而言，忽略负荷电流时，$\dot{I}_a = 0$，所以A相不动作。而B相和C相的短路电流$\dot{I}_b = -\dot{I}_c$，由$\dot{E}_{bc}$产生，$\dot{I}_b$滞后于$\dot{E}_{bc}$的相位角为φ_L（短路点至保护安装处之间线路的阻抗角，其变化范围为$0° \leqslant \varphi_L \leqslant 90°$），如图2.31(a)所示。

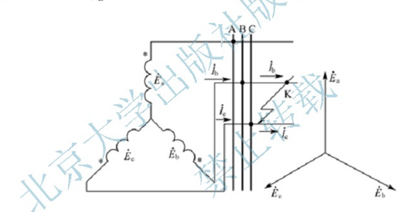
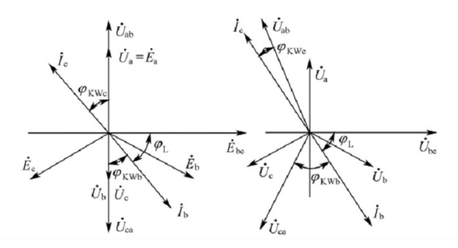


图2.30　B、C相短路时的系统接线图

对于B相的功率方向元件，$\dot{I}_{KWb} = \dot{I}_b$，$\dot{U}_{KWb} = \dot{U}_{ca}$，则$\varphi_{KWb} = -(90° - \varphi_L)$，因为$0° \leqslant \varphi_L \leqslant 90°$，所以$-90° \leqslant \varphi_{KWb} \leqslant 0°$，所以能使B相的功率方向元件动作的内角$\alpha$为$0° \leqslant \alpha \leqslant 90°$。



(a) 近处短路　　　　　　　　　　(b) 远处短路

图 2.31　B、C 两相短路时保护安装处电压、电流相量图

对于 C 相的功率方向元件，$\dot{I}_{\text{KWc}}=\dot{I}_{\text{c}}$，$\dot{U}_{\text{KWc}}=\dot{U}_{\text{ab}}$，则 $\varphi_{\text{KWc}}=-(90°-\varphi_{\text{L}})$，因为 $0°\leqslant\varphi_{\text{L}}\leqslant 90°$，所以 $-90°\leqslant\varphi_{\text{KWc}}\leqslant 0°$，即能使 C 相的功率方向元件动作的内角 α 为 $0°\leqslant\alpha\leqslant 90°$。

在保护安装处附近正方向两相短路时，只要满足内角为 $0°\leqslant\alpha\leqslant 90°$，则两相功率方向元件就能够正确动作。

(2) 短路点远离保护安装处。因为短路点远离保护安装处，所以可认为保护安装处三相电压是对称的，即 $\dot{U}_{\text{a}}=\dot{E}_{\text{a}}$，$\dot{U}_{\text{b}}=\dot{E}_{\text{b}}$，$\dot{U}_{\text{c}}=\dot{E}_{\text{c}}$，当 B、C 两相短路时，$\dot{I}_{\text{b}}=-\dot{I}_{\text{c}}$，而 $\dot{I}_{\text{b}}$ 由 $\dot{U}_{\text{bc}}$ 产生，并滞后于 $\dot{U}_{\text{bc}}$ 的相位角为 φ_{L}（短路点至保护安装处之间线路的阻抗角，其变化范围为 $0°\leqslant\varphi_{\text{L}}\leqslant 90°$），如图 2.31(b)所示。

对于非故障的 A 相功率方向元件，若不考虑负荷电流，则继电器不动作。

对于 B 相的功率方向元件，$\dot{I}_{\text{KWb}}=\dot{I}_{\text{b}}$，$\dot{U}_{\text{KWb}}=\dot{U}_{\text{ca}}$，则 $\varphi_{\text{KWb}}=-(120°-\varphi_{\text{L}})$，因为 $0°\leqslant\varphi_{\text{L}}\leqslant 90°$，所以 $-120°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant -30°$，所以能使 B 相的功率方向元件动作的内角 α 的范围为 $30°\sim 120°$。

对于 C 相的功率方向元件，$\dot{I}_{\text{KWc}}=\dot{I}_{\text{c}}$，$\dot{U}_{\text{KWc}}=\dot{U}_{\text{ab}}$，则 $\varphi_{\text{KWc}}=-(60°-\varphi_{\text{L}})$，因为 $0°\leqslant\varphi_{\text{L}}\leqslant 90°$，所以 $-60°\leqslant\varphi_{\text{KWc}}\leqslant 30°$，所以能使 C 相的功率方向元件动作的内角 α 的范围为 $-30°\sim 60°$。

所以，在远离保护安装处正方向两相短路时，要使 B、C 两相的功率方向元件都能动作的内角 α 的范围为 $30°\sim 60°$。

所以，正方向不论近处还是远处 B、C 两相短路时，使故障相继电器动作的内角 α 的范围是 $30°\sim 60°$。

采用同样的方法，可以分析出 AB、CA 两相短路时的情况，其测量角度 φ_{KW} 的变化范围如表 2-3 所示。

表 2-3　90° 接线方式的功率方向元件各类相间短路时测量角度的变化范围

故障类型	三相短路	AB 两相短路		BC 两相短路		CA 两相短路	
		近处	远处	近处	远处	近处	远处
KW_1	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWa}}\leqslant 0°$	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWa}}\leqslant 0°$	$-120°\leqslant\varphi_{\text{KWa}}\leqslant -30°$	—	—	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWa}}\leqslant 0°$	$-60°\leqslant\varphi_{\text{KWa}}\leqslant 30°$
KW_2	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant 0°$	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant 0°$	$-60°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant 30°$	$-90°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant 0°$	$-120°\leqslant\varphi_{\text{KWb}}\leqslant -30°$	—	—

KW_3	$-90° \leqslant \varphi_{KWc} \leqslant 0°$	—	—	$-90° \leqslant \varphi_{KWc} \leqslant 0°$	$-60° \leqslant \varphi_{KWc} \leqslant 30°$	$-90° \leqslant \varphi_{KWc} \leqslant 0°$	$-120° \leqslant \varphi_{KWc} \leqslant -30°$

从表 2.3 中可以看出，在发生各种类型的相间短路时，90° 接线方式的功率方向元件的 φ_{KW} 变化范围总是在 $-120° \leqslant \varphi_{KW} \leqslant 30°$，称为变化总范围。所以，对于动作区为 $\varphi_{sen} \pm 90°$ 的功率方向元件来说，为获得最大的灵敏角，取 $\varphi_{sen} = -30° \sim -60°$，即 α 的范围是 $30° \sim 60°$ 就完全能够满足对它的要求，则不管短路点远近，它都能正确判断各种相间短路的短路功率方向。

用于保护相间短路的功率方向元件，都具有 $\varphi_{sen} = -45°$ 和 $\varphi_{sen} = -30°$ 两个最大灵敏角，即当接 $R_{\varphi 1}$ 时，$\varphi_I = 45°$，则 $\alpha = \varphi_u - \varphi_I = 90° - 45° = 45°$；当接 $R_{\varphi 2}$ 时，$\varphi_I = 60°$，则 $\alpha = \varphi_u - \varphi_I = 90° - 60° = 30°$。

90° 接线方式的主要优点是：不论发生三相短路还是两相短路，继电器均能正确判断故障方向；选择合适的继电器内角 α，在各种相间短路时可使继电器工作在最大灵敏线附近。

2.2.4 方向性电流保护的整定计算

方向性电流保护的整定计算与单侧电源三段式电流保护的整定原则基本相同，但有几点不同需要说明。

1. Ⅰ段方向电流速断保护

如图 2.32 所示，对保护 1，$I_{OP\cdot 1}^{I} = K_{rel}^{I} I_{k2\cdot max}$（$I_{k2\cdot max}$ 为本线路末端最大短路电流）。如果保护 1 的反向电流 $I_{k1\cdot max} > I_{k2\cdot max}$，则 $I_{OP\cdot 1}^{I}$ 的整定有两种不同的方案：

(1) 按本线路末端最大短路电流整定，即 $I_{OP\cdot 1}^{I} = K_{rel}^{I} I_{k2\cdot max}$，但为防止反方向短路误动作，应加装功率方向元件，即采用方向电流速断保护。但此方案必有位于线路首端的电压死区，在死区范围内，保护将拒动。

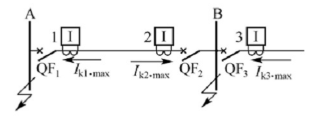


图 2.32 双侧电源线路电流保护整定说明图

(2) 按最大反向短路电流来整定，即 $I_{OP\cdot 1}^{I} = K_{rel}^{I} I_{k1\cdot max}$，但增大了保护 1 的动作电流，使其灵敏度降低，保护区缩小了。但这种方案不需增设功率方向元件，也没有线路首端的电压死区。

两种方案可根据系统线路的实际条件来决定。

2. Ⅱ段方向性限时电流速断保护

以图 2.33 中的保护 2 和 3 为例来说明：

(1) 若 $t_2^{\rm II} > t_3^{\rm II}$ 或 $I_{\rm k2 \cdot max} < I_{\rm set \cdot 2}^{\rm II}$，则保护 2 的第Ⅱ段可不装设功率方向元件。

(2) 若 $t_3^{\rm II} > t_2^{\rm II}$ 或 $I_{\rm k3 \cdot max} < I_{\rm set \cdot 3}^{\rm II}$，则保护 3 的第Ⅱ段也可不装设功率方向元件。

(3) 若 $t_3^{\rm II} = t_2^{\rm II}$ 且 $I_{\rm k2 \cdot max} > I_{\rm set \cdot 2}^{\rm II}$ 和 $I_{\rm k3 \cdot max} > I_{\rm set \cdot 3}^{\rm II}$，则保护 2 和保护 3 的第Ⅱ段均应加装功率方向元件。

3. Ⅲ段方向性定时限过电流保护

在图 2.33 所示的单侧电源环形网络中，线路 L_2 的最大负荷完全有可能小于线路 L_1 的，即 $I_{\rm L2 \cdot max} < I_{\rm L1 \cdot max}$，则使 $I_{\rm set \cdot 4}^{\rm III} < I_{\rm set \cdot 2}^{\rm III}$。当线路 L_1 上发生短路时，若 $I_{\rm set \cdot 2}^{\rm III} > I_{\rm K} > I_{\rm set \cdot 4}^{\rm III}$，则保护 4 的第Ⅲ段动作，而保护 2 的第Ⅲ段拒动，使负荷 H_2 失去电源，扩大了停电范围(无选择性)，所以，保护 4 的第Ⅲ段是误动。为防止发生这种误动，则必须保证

$$I_{\rm set \cdot 6}^{\rm III} > I_{\rm set \cdot 4}^{\rm III} > I_{\rm set \cdot 2}^{\rm III} \qquad t_6^{\rm III} > t_4^{\rm III} > t_2^{\rm III}$$

和

$$I_{\rm set \cdot 1}^{\rm III} > I_{\rm set \cdot 3}^{\rm III} > I_{\rm set \cdot 5}^{\rm III} \qquad t_1^{\rm III} > t_3^{\rm III} > t_5^{\rm III}$$

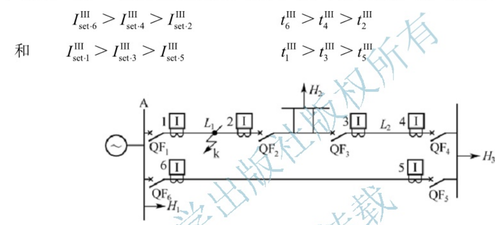


图 2.33 单侧电源环形网络图

这样，当 k 点短路时，$I_{\rm k}$ 可能小于 $I_{\rm set \cdot 2}^{\rm III}$ (经过保护 2 的路径长，电流小)，而使保护 2 不动作。但此时因 k 点经保护 1 至电源的路径很短，所以通过保护 1 的电流很大，保护 1 一定能动作，使 $\rm QF_1$ 跳闸，之后，使 $I_{\rm k}$ 随之大大增加，则保护 2 也就动作了。保护 2 的这种动作行为称为相继启动。

所谓相继启动，是指一条线路两侧的保护装置，当线路上发生短路时，其中一侧的保护装置先动作，等它作用于跳闸后，另一侧保护装置才动作。出现这种动作行为的线路长度，称为保护装置的相继动作区。

保护装置的相继动作区，取决于环形线路各段长度之比和故障电流与动作电流之比。因此，相继动作不仅在靠近电源母线处短路时发生，而且可能发生在头段线路的大部分区域或全线路上，有时甚至伸长到相邻线路上去。

保护装置的相继启动，将增加整个电网切除故障的时间，这是不希望的。但由于网络的结构和保护装置的工作原理，决定了相继启动是不可避免的。因此，有时可利用相继启动来保证保护装置的灵敏度。例如在图 2.34 中，保护装置 2 的灵敏度可按 k 点短路时 $\rm QF_1$ 跳闸后来校验。

2.2.5 对方向性电流保护的评价

方向性电流保护是为满足多侧电源辐射形电网和单侧电源环网的需要，在单侧电源辐

射形电网的电流保护的基础上增设功率方向元件构成的，所以能够保证各保护之间动作的选择性，这是方向电流保护的主要优点。但当继电保护中应用方向元件后将使接线复杂，投资增加，同时保护安装处附近正方向发生三相短路时，存在电压死区，使整套保护装置拒动，当电压互感器二次侧开路时，方向元件还可能误动作，并且当系统运行方式变化时，会严重影响保护的技术性能。这是方向电流保护的缺点。

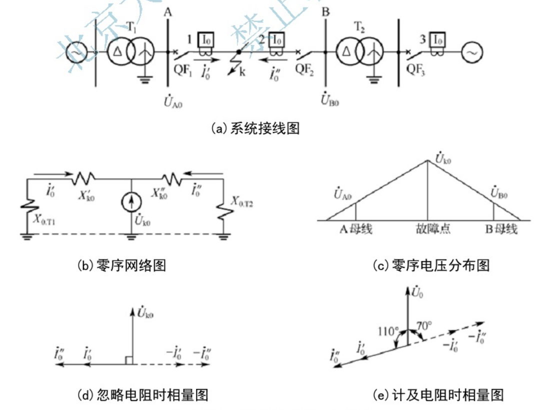
2.3　大电流接地系统的零序电流保护

在电力系统中，中性点的工作方式有中性点直接接地、中性点经消弧线圈接地和中性点不接地三种，后两种也称非直接接地。在我国，110 kV 及以上电压等级的电网都采用中性点直接接地方式，而 3 kV ～35 kV 的电网采用中性点非直接接地方式。在中性点直接接地的系统中，发生单相接地短路时，将出现很大的故障相电流和零序电流，故又称为大电流接地系统。在中性点非直接接地的系统中，发生单相接地时，因构不成短路回路，在故障点上流过比负荷电流小得多的电流，故又称为小电流接地系统。

本节根据大电流接地系统发生单相接地故障时，在电网中产生的零序分量的特点，分别介绍零序分量过滤器及零序电流保护、零序方向电流保护的接线及整定，并指出零序电流保护的优缺点。

2.3.1　接地时零序分量的特点

在大电流接地系统中，当正常运行和发生相间短路时，三相对地电压之相量和为零，三相电流之相量和也为零，无零序电压和零序电流。当发生单相接地短路时，将出现零序电压和零序电流，如图 2.34 所示。



(a) 系统接线图

(b) 零序网络图　　(c) 零序电压分布图

(d) 忽略电阻时相量图　　(e) 计及电阻时相量图

图 2.34　单相接地时的零序网络

零序电流可以看成是在故障点出现一个零序电压$\dot{U}_{k0}$而产生的，它必须经过变压器接地的中性点构成回路。所以，零序电流只能在中性点接地的电网中流动。对零序电流的方向，规定母线流向线路为正，而零序电压的正负以大地为基准，线路高于大地的电压为正，低于大地的电压为负。这样形成的网络称为零序网络，如图 2.34(b)所示。由此可知，零序电流的实际方向，是线路流向母线的方向。零序网络中的零序电压、零序电流、零序功率等统称为零序分量，其有如下特点。

1. 零序电压

零序电压的最高点位于接地故障处，系统中距故障点越远处的零序电压越低。零序电压的分布如图 2.34(c)所示。保护安装处的母线零序电压为$\dot{U}_{A0}$（$\dot{U}_{B0}$），其大小主要取决于变压器的零序电抗$X_{0\cdot T1}$（$X_{0\cdot T2}$）。

2. 零序电流

(1) 零序电流是由零序电压产生的，它必须经过变压器中性点构成回路。所以它只能在中性点接地的网络中流动，而中性点不接地的网络中不存在零序电流。

(2) 零序电流与零序电压的相位关系。当忽略回路电阻时，回路为纯电感电路，其相位关系按规定正方向画出如图 2.34(d)所示(虚线为电流的实际方向)。当计及回路电阻时，如取零序阻抗角$\varphi_{k0}=70°$时，其相位关系如图 2.34(e)所示，则零序电流将超前零序电压$110°$。

(3) 零序电流的分布，主要取决于线路的零序阻抗和中性点接地变压器的零序阻抗，而与电源的数目和位置无关。如当变压器T_2的中性点不接地时，则$I_0''=0$。所以，只要系统中性点接地的数目和分布不变，即使电源运行方式变化，零序网络仍保持不变，这就使零序电流保护受电源运行方式的影响减小。

(4) 零序电流保护的灵敏度直接决定于系统中性点接地的数目和分布。所以要求变压器中性点不应任意改变其接地方式。

3. 零序功率

零序功率是由故障点流向电源，即由故障线路流向母线。而通常规定，母线到线路的方向为正。所以，对于零序功率方向元件，它是在负值零序功率下动作的。零序功率方向元件的输入电压与输入电流之间的相位差完全取决于变压器的零序阻抗角，如$\dot{U}_{A0}$与$\dot{I}_0'$之间的相位差则决定于变压器T_1的零序阻抗角，与被保护线路的零序阻抗及故障点的位置无关。

所以，用零序电流和零序电压的幅值以及它们的相位关系即可实现接地短路的零序电流保护和零序方向保护。

4. 变压器中性点接地方式的选择

系统中全部或部分变压器中性点直接接地是大接地电流系统的标志。其主要目的是降低对整个系统绝缘水平的要求。但中性点接地变压器的台数、容量及其分布情况变化时，

零序网络也随之改变，因此，同一故障点的零序电流分布也随之改变。所以变压器的中性点接地情况改变，将直接影响零序电流保护的灵敏性。因此，对变压器中性点接地的选择要满足下面两条要求：

(1) 不使系统出现危险的过电压。

(2) 不使零序网络有较大改变，以保证零序电流保护有稳定的灵敏性。

根据上述两条要求，变压器中性点接地方式选择的原则如下：

(1) 在多电源系统中，每个电源处至少有一台变压器中性点接地，以防止中性点不接地的电源因某种原因与其他电源切断联系时，形成中性点不接地系统。在图 2.35(a)中，如变压器 T1 的中性点不接地，当线路 AB 上发生接地短路时，B 侧零序保护先动作跳开 B 侧断路器，则 A 侧成为一个中性点不接地系统并带接地故障点运行，从而会产生危险的弧光电压，使按大接地电流系统设计的设备的绝缘遭受到破坏。

(2) 在双母线按固定联接方式运行的变电站，每组母线上至少应有一台变压器中性点直接接地。这样，当母线联络开关断开后，每组母线上仍保留一台中性点直接接地的变压器。

(3) 每个电源处有多台变压器并联运行时，规定正常时按一台变压器中性点直接接地运行，其他变压器中性点不接地。这样，当某台中性点接地变压器由于检修或其他原因切除时，将另一台变压器中性点接地，以保持系统零序电流的大小与分布不变。

(4) 两台变压器并联运行，应选用零序阻抗相等的变压器，正常时将一台变压器中性点直接接地。当中性点接地变压器退出运行时，则将另一台变压器中性点直接接地运行。

(5) 220kV 以上大型电力变压器都为分级绝缘，且分为两种类型，其中绝缘水平较低的一种（500kV 系统，中性点绝缘水平为 38kV 的变压器），中性点必须直接接地。

2.3.2 零序分量过滤器

零序电流和零序电压是通过零序分量过滤器取得的，零序分量过滤器有零序电压过滤器和零序电流过滤器两种。

1. 零序电压过滤器

为取得零序电压，可采用以下几种接线方式的互感器。

1）采用三个单相电压互感器

如图 2.35(a)所示，一次绕组接成星形，并将中性点直接接地；二次绕组三个相互串联，接成开口三角形，则从 mn 两端即可获得零序电压 $3\dot{U}_0=\dot{U}_a+\dot{U}_b+\dot{U}_c$ 。

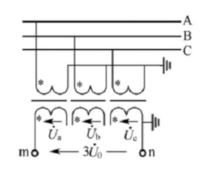
2）采用三相五柱式三绕组电压互感器

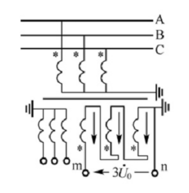
如图 2.35(b)所示，一次绕组接成星形，并将中性点直接接地；二次绕组有两组线圈，一组接成星形，用于接测量仪表或继电器，另一组接成开口三角形，从开口处即可获得零序电压 $3\dot{U}_0=\dot{U}_a+\dot{U}_b+\dot{U}_c$ 。

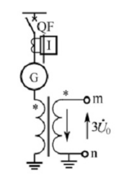
3）对于发电机

当发电机的中性点经电压互感器或消弧线圈接地时，从它的二次绕组中也能获得零序

电压，如图 2.35(c)所示。







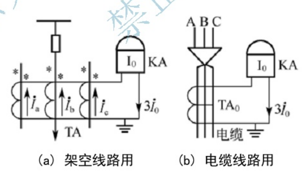
（a）三个单相电压互感器接线　　（b）三相五柱式接线　　（c）发电机中性点接线

图 2.35　零序电压过滤器

2. 零序电流过滤器

对于架空线路，为取得零序电流，通常采用三个单相电流互感器，接成完全星形接法，如图 2.36(a)所示，其继电器中得到的电流为$3\dot{I}_0=\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$（实际就是中线中流过的电流）。所以，实际应用中，并不需要专门的零序电流过滤器，而是将继电器接入相间短路保护用电流互感器的中线上就可以了。

对于电缆线路，如图 2.36(b)所示，将互感器套在电缆外面，从铁芯中穿过的电缆就是电流互感器的一次绕组，其一次电流是$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c$，正常时，$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$，只有当一次侧出现零序电流时，即$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c\neq 0$，在二次侧才有相应的$3\dot{I}_0$输出，其主要特点就是接线简单。



（a）架空线路用　　（b）电缆线路用

图 2.36 零序电流过滤器

2.3.3　三段式零序电流保护

零序电流保护与三段式相间短路保护基本相似，也分为三段式：零序电流 I 段为瞬时零序电流速断，只保护线路的一部分；零序电流 II 段为限时零序电流速断，可保护本线路全长，并与相邻线路零序电流速断保护相配合，带有 0.5s 延时，它与零序电流 I 段共同构成本线路接地故障的主保护；零序电流 III 段为零序过电流保护，动作时限按阶梯原则整定，它作为本线路和相邻线路的单相接地故障的后备保护。

零序电流与线路的阻抗有关，可以作出$3\dot{I}_0$随线路长度L变化的关系曲线，然后进行整定，其整定原则类似于相间短路的三段式电流保护。

1. 零序电流Ⅰ段——零序电流速断保护

零序电流速断保护的动作电流 I_{set}^{I} 的整定应考虑以下三个原则：

(1) 为保证选择性，I_{set}^{I} 应大于本线路末端单相或两相接地短路时流过保护安装处的最大零序电流 $3I_{0\cdot max}$，即

$$I_{set}^{I}=K_{rel}^{I}\cdot 3I_{0\cdot max} \tag{2-34}$$

式中 K_{rel}^{I}——可靠系数，取1.2～1.3。

(2) 应大于断路器三相不同时合闸(非全相运行)时出现的最大零序电流 $I_{0\cdot unc}$，即

$$I_{set}^{I}=K_{rel}^{I}\cdot 3I_{0\cdot unc} \tag{2-35}$$

式中 K_{rel}^{I}——可靠系数，取1.1～1.2。

注：①按上述原则整定时，应选取其中较大者作为零序电流速断保护的动作电流；②若零序一段的动作时间(保护固有时间)大于断路器三相不同时合闸的时间，则不需考虑 $I_{0\cdot unc}$ 的影响，只按原则1整定；③在有些情况下，若按原则(2)整定将使启动电流过大，保护范围过小，这时可采用：合闸时(手动或自动)使零序1段带有一个小的延时(0.15s)，以躲过三相不同时合闸的时间，这样整定时也不需要考虑原则(2)了。

(3) 当系统采用单相自动重合闸时（哪相接地，哪相跳闸，然后自动重合闸），单相短路故障被切除后，系统处于非全相运行状态，并伴有系统振荡，此时将会出现很大的零序电流 $3I_{0\cdot unc}$。若 $3I_{0\cdot unc}>I_{set}^{I}$（$I_{set}^{I}$ 按上述原则整定的），则保护将要误动作。

若按 $3I_{0\cdot unc}$ 整定，则动作电流过大，使保护范围缩小，不能充分发挥零序Ⅰ段的作用。此时，应设置灵敏度不同的两套零序电流速断保护：

① 灵敏的Ⅰ段：I_{set}^{I} 仍按上述原则整定，因动作值小，保护范围大，所以灵敏。主要任务是对全相运行状态下的接地故障进行保护。当单相自动重合闸启动时(即开始切除单相接地故障时)将其自动闭锁，待恢复全相运行时再重新投入。

② 不灵敏的Ⅰ段：其整定原则为

$$I_{set}^{I}=K_{rel}^{I}\cdot 3I_{0\cdot unc} \tag{2-36}$$

因动作值大，保护范围小，所以不灵敏。主要任务是专为非全相运行状态下(如单相自动重合闸过程中)，其他两相又发生了单相接地故障时的保护，以便尽快地将故障切除。当然，它也能反应全相运行状态下的接地故障，只是其保护范围比灵敏的Ⅰ段要小。

2. 零序电流Ⅱ段——限时零序电流速断保护

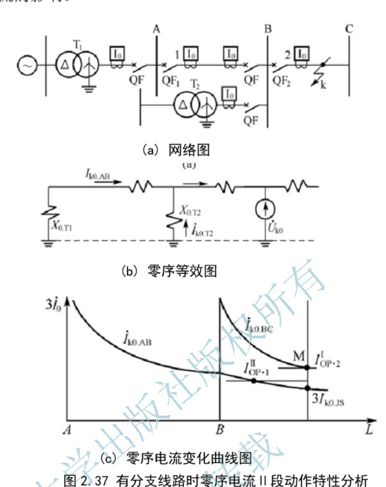
限时零序电流速断保护的整定原则与相间短路的限时电流速断保护相同，即考虑与下一条线路的零序Ⅰ段保护相配合，如图2.37所示。

$$I_{set\cdot 1}^{II}=K_{rel}^{II}\cdot I_{set\cdot 2}^{I} \tag{2-37}$$

式中 K_{rel}^{II}——可靠系数，取1.1～1.2。

但应注意，当两个保护之间的变电所母线上接有中性点接地的变压器时，应该考虑变

压器对零序电流分流的影响。



(a) 网络图

(b) 零序等效图

(c) 零序电流变化曲线图

图 2.37 有分支线路时零序电流Ⅱ段动作特性分析

如图 2.37 所示网络，在两个保护之间的变电所 B 母线上接有中性点接地变压器 T_2，沿线路各点发生接地短路时，流过线路 AB 的零序电流 $3I_{k0\cdot AB}$ 与短路距离 L 的关系曲线不再是单调平滑变化的，如图 2.37(c)所示，这是 Y_0/Δ 接线的变压器 T_2 分流作用的结果。

为确定保护 1 的零序电流Ⅱ段的动作电流，当已知流过 BC 线路的 $3I_{k0\cdot BC}$ 与 L 的关系曲线和 $I_{set\cdot 2}^{I}$ 时，就可确定保护 2 零序电流速断保护的保护范围末端 M 点的位置，进而由 $3I_{k0\cdot AB}$ 与 L 的关系曲线和 M 点的位置，可计算出在 M 点发生接地故障时流过线路 AB 的零序电流计算值 $3I_{k0\cdot JS}$，则可得保护 1 限时电流速断保护的动作电流为

$$I_{set\cdot 1}^{II}=K_{rel}^{II}\cdot 3I_{k0\cdot JS} \tag{2-38}$$

当变压器 T_2 退出或改为中性点不接地运行时，$3I_{k0\cdot BC}$ 与 $3I_{k0\cdot AB}$ 平滑曲线重合，$3I_{set\cdot JS}=I_{set\cdot 2}^{I}$，则 $I_{set\cdot 1}^{II}=K_{rel}^{II}\cdot I_{set\cdot 2}^{I}$。

为保证选择性，按上述原则整定的零序电流Ⅱ段应比下一条线路零序电流Ⅰ段的动作时限大一个时限级差Δt，即 $t_1^{II}=0.5s$。

限时零序电流速断保护的灵敏系数按被保护线路末端发生接地短路时的最小零序电流来校验。设 B 母线接地短路时流过 AB 线路的最小零序电流为 $3I_{k0\cdot min}$，则灵敏系数为

$$K_{sen\cdot 1}^{II}=\frac{3I_{k0\cdot min}}{I_{set\cdot 1}^{II}}\geqslant 1.3\sim 1.5 \tag{2-39}$$

如果灵敏系数不能满足要求，则可改用与保护 2 零序电流Ⅱ段相配合。此外还可以考虑用以下方式解决：

(1) 用两个灵敏度不同的零序Ⅱ段保护。即保留 0.5s 的零序电流保护，以便快速切除正常运行方式和最大运行方式下线路上所发生的接地故障；同时再增加一个与下级线路零序电流Ⅱ段保护相配合的Ⅱ段保护，它能保证在各种运行方式下线路上发生短路时，保护装置具有足够的灵敏系数。这样与零序电流速断保护和零序过电流保护共同组成四段式零序电流保护。

(2) 从电网接线的全局考虑，可改用接地距离保护。

3. 零序电流 III 段——定时限零序过电流保护

定时限零序过电流保护的作用相当于相间短路的过电流保护，在一般情况下是作为后备保护使用的，但在中性点直接接地系统中的终端线路上，也可以作为主保护使用。其动作电流 I_{set}^{III} 应按照下列原则进行整定：

(1) I_{set}^{III} 应大于相邻线路首端(本线路末端)三相短路时所出现的最大零序不平衡电流，即

$$I_{set}^{III}=K_{rel}^{III}\cdot I_{0\cdot unb\cdot max} \tag{2-40}$$

$$I_{0\cdot unb\cdot max}=K_{np}K_{st}\Delta f\cdot I_{k\cdot max} \tag{2-41}$$

式中　K_{rel}^{III}——可靠系数，取 1.1～1.2；

K_{np}——非周期分量影响系数，当采用自动重合闸后加速时为 1.5～2.0，其他情况为1；

K_{st}——电流互感器同型系数，取 0.5；

Δf——电流互感器误差，取 $\Delta f=0.1$；

$I_{k\cdot max}$——相邻线路首端最大三相短路电流。

(2) I_{set}^{III} 应大于非全相运行时 $3I_0$，即

$$I_{set}^{III}=K_{rel}^{III}\cdot 3I_0 \tag{2-42}$$

(3) 按与相邻线路的零序电流 II 段或 III 段配合进行整定。

按上述的整定原则计算，应选取其中较大者作为 I_{OP}^{III} 的整定值。

关于零序 II、III 段保护的配置情况如下：

① 零序 II 段保护只与相邻线路的瞬动保护段配合，设置零序 III 段保护与相邻线路零序 II 段的保护配合，不满足灵敏系数要求时，再与相邻线路的零序 III 段保护配合并要求有足够的灵敏系数。

② 零序 II 段保护与相邻线路瞬动保护段配合，若能满足灵敏系数要求则不设置零序 III 段保护，否则设置零序 III 段保护，其整定要求同上。有时为了缩短零序 III 段保护的动作时限，可以只和 0.5s 的零序 II 段保护配合，灵敏系数不够就按保证本线路末端接

地短路时有足够的灵敏系数计算。

③ 用零序 II 段保护能保证本线路末端接地短路的灵敏系数时，不设置零序 III 段保护。

定时限零序过电流保护作为本线路近后备保护的灵敏系数应按本线路末端接地短路时流过保护的最小零序电流校验，要求 $K_{sen} \geqslant 1.3$；当作为相邻线路的远后备保护时，应按相邻线路末端接地短路时流过本保护的最小零序电流来检验，要求 $K_{sen} \geqslant 1.2$。当两个保护之间具有分支线路时，应考虑分支线路的影响。同时还必须要求各保护的零序三段保护之间的灵敏系数的相互配合，即本级的灵敏系数一定要小于下一级的灵敏系数。

定时限零序过电流保护的动作时限按阶梯原则确定，如图 2. 40 所示。必须注意的是，在(Y_0,d)接法的变压器低压侧的任何故障都不会在高压侧引起零序电流，因此，保护 3 的零序过电流可以是瞬时动作的，所以对零序过电流保护来说，动作时限可从保护 3 开始逐级配合，即 $t_{0\cdot 2}^{III} = t_{0\cdot 3}^{III} + \Delta t$，$t_{0\cdot 1}^{III} = t_{0\cdot 2}^{III} + \Delta t$。为便于比较，将反应相间短路的过电流保护的时限特性也画在同一图中，它是从保护 4 开始逐级配合的。由图 2. 38 可知，同一线路上零序过电流保护的动作时限小于相间短路过电流保护的动作时限。这是零序过电流保护的优点之一。

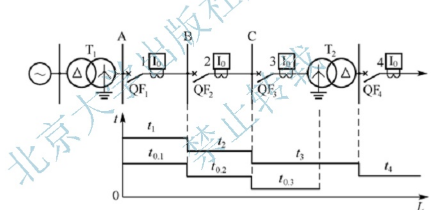


图 2. 38　零序过电流保护动作时限特性

实践表明，在 220kV～500 kV 的输电线路上发生单相接地故障时，往往会有较大的过渡电阻存在，当导线对位于其下面的树木等放电时，接地过渡电阻可能达到100Ω ～300Ω。此时通过保护装置的零序电流很小，上述的零序电流保护均难以动作。为了在这种情况下能够切除故障，可考虑采用零序反时限过电流保护，继电器的动作电流可按照躲过正常情况下出现的不平衡电流进行整定。

2. 3. 4　方向性零序电流保护

在双侧或多侧电源的网络中，电源处变压器的中性点至少有一台要接地，由于零序电流的实际流向是由故障点流向各个中性点接地的变压器，因此，在变压器接地数目比较多的复杂网络中，就需要考虑零序电流保护动作的方向性问题。

1. 方向性零序电流保护工作原理

如图 2.39 所示，线路两侧电源处的变压器中性点均直接接地，这样当 k_1 点发生接地短路时，其零序等效网络和零序电流分布如图 2.39(b)所示，按照选择性的要求，应该由保护

1、2 动作切除故障，但是零序电流 $I''_{0\cdot k_1}$ 流过保护 3 时，就可能引起保护 3 的误动作。同样当 k_2 点发生接地短路时，其零序等效网络和零序电流分布如图 2.39(c)所示，其零序电流 $I'_{0\cdot k_2}$ 又可能使保护 2 误动作。这与双侧电源电网反应相间短路的电流保护一样。为了保证位于母线两侧的零序电流保护有选择性地切除故障，必须在零序电流保护中加装功率方向元件，构成零序电流方向保护。此时，只需按同一方向的零序电流保护进行配合，并构成阶段式零序方向电流保护。

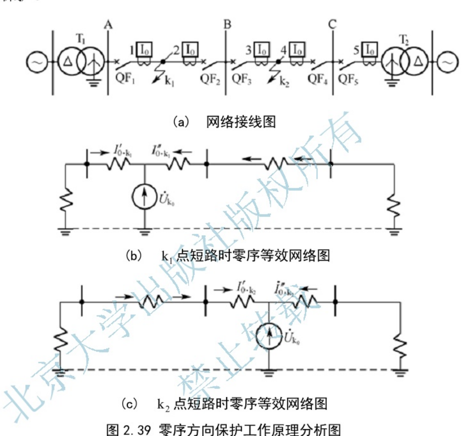


图 2.39 零序方向保护工作原理分析图

2. 零序功率方向元件

为判别零序功率的方向，在零序电流保护装置中应接入零序功率方向元件，它反应于零序功率方向而动作，其整流型的零序功率方向元件与反应相间短路的整流型功率方向元件的工作原理和构成方法基本相同，差别仅在于接线方式不同。因为零序功率方向元件反应的是零序功率的方向，所以需要接入零序电压 $3\dot{U}_0$ 和零序电流 $3\dot{I}_0$；又因为接地故障点越靠近保护安装处，零序电压越高，所以零序功率方向元件不存在电压“死区”问题。这里仅说明零序功率方向元件的接线方法。

由图 2.34(e)可知，当 k 点发生接地短路时，按规定的正方向看，零序电压 $\dot{U}$ 将滞后于零序电流 $\dot{I}'_0$ 或 $\dot{I}''_0$ 约 90°～110°，即保护安装地点背后的零序阻抗角为 90°～70°。这时装设于保护 1 和 2 的零序方向电流保护均应正确动作，并应工作在最灵敏的条件下，即零序功率方向元件的最大灵敏角为 $\varphi_{sen}=-70°\sim-90°$（负号表示电流超前电压）。而生产厂家实际制造的零序功率方向元件的最灵敏的角度是 70°～85°，即电流滞后于电压 70°～85° 时

继电器动作最灵敏。所以，在使用零序功率方向元件时，若 $3\dot{I}_0$ 以正极性端接入继电器电流线圈的极性端，则 $3\dot{U}_0$ 必须以负极性端接入继电器电压线圈的极性端，如图 2.40 所示，反之亦然。

具体接线如图 2.40 所示，将零序功率方向元件电流线圈的极性端子与零序电流过滤器的极性端子相连，以取得 $3\dot{I}_0$；而把继电器电压线圈的极性端子与零序电压过滤器的非极性端子相连，以取得 $-3\dot{U}_0$。其矢量关系如图 2.41 所示，正好符合最灵敏的条件。这一点在实际工作中须特别注意，否则，将失去动作的方向性。

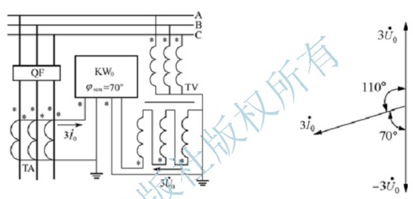


图 2.40 零序功率方向元件的接线

图 2.41 零序电流与零序电压的相位关系

3. 三段式零序方向电流保护

三段式零序方向电流保护由零序方向电流速断保护、限时零序方向电流速断保护和零序方向过电流保护组成，其原理接线如图 2.42 所示。

在同一保护方向上零序方向电流保护的动作电流和动作时限的整定计算原则以及灵敏系数的校验与三段式零序电流保护相同。因为接地故障点的 $3\dot{U}_0$ 最大，所以当接地故障位于保护安装处附近时不会出现继电器的电压死区。相反，当接地点距保护安装处较远时，零序电压和零序电流都较低，继电器可能不启动，所以要校验其灵敏度，即相邻线路末端接地短路时流经本保护的最小零序功率与继电器的动作功率之比值(即灵敏系数)要求不小于 2.0 。

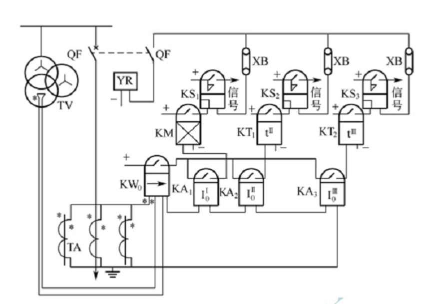


图 2.42 三段式零序方向电流保护原理接线图

2.3.5 对零序电流保护的评价

1. 优点

1）灵敏性高

由于线路的零序阻抗较正序阻抗大，所以线路始端和末端接地短路时，零序电流变化显著，曲线较陡，因此，零序电流Ⅰ段和零序电流Ⅱ段保护范围较长。

此外，零序过电流保护按躲过最大不平衡电流来整定，继电器的动作电流一般为 2A ～ 3A 。而相间短路的过电流保护要按最大负荷电流来整定，动作电流值通常都大于零序过电流保护的动作电流值。所以，零序过电流保护灵敏性高。

另外，零序电流保护受系统运行方式变化的影响要小，保护范围较稳定。因为系统运行方式变化时，零序网络不变或变化不大，所以零序电流的分布基本不变。

2）速动性好

由图 2.38 可见，零序过电流保护的动作时限比相间短路过电流保护的动作时限要短。尤其是对于两侧电源的线路，当线路内部靠近任一侧发生接地短路时，本侧零序电流保护Ⅰ段动作跳闸后，对侧零序电流将增大，可使对侧零序电流保护Ⅰ段也相继动作跳闸，因而使总的故障切除时间更加缩短。

3）不受过负荷和系统振荡的影响

当系统中发生某些不正常运行状态，如系统振荡、短时过负荷时，三相仍然是对称的，不产生零序电流，因此，零序电流保护不受其影响，而相间短路电流保护可能受其影响而误动作，所以需要采取必要的措施予以防止。

4）方向零序电流保护在保护安装处接地时无电压死区

由于愈靠近故障点的零序电压愈高，因此，零序方向元件没有电压死区。相反当故障点距保护安装处地点愈远，由于保护安装处的零序电压较低，零序电流较小，必须校验方向元件在这种情况下的灵敏系数。如当零序保护作为相邻元件的后备保护时，即采用相邻元件末端短路时，在本保护安装处的最小零序电流、电压或功率（经互感器转换后的二次

值）与功率方向元件的最小启动电流、电压或功率之比来计算灵敏系数，并要求 $K_{sen} \geq 1.5$ 。

5）应用广泛

零序电流保护较之其他保护实现简单、可靠，在110kV 及以上的高压和超高压电网中，单相接地故障约占全部故障的 70% ～ 90% ，而且其他的故障也都是由单相故障发展起来的，所以零序电流保护就为绝大多数的故障提供了保护，具有显著的优越性，因此，在中性点直接接地的高压和超高压系统中获得普遍应用。

2. 缺点

1）受变压器中性点接地数目和分布的影响

对于运行方式变化很大或接地点变化很大的电网，保护往往不能满足系统运行所提出的要求。

2）准确动作率受非全相运行的影响

随着单相自动重合闸的广泛应用，在重合闸动作的过程中将出现非全相运行状态，再考虑到系统两侧的发电机发生摇摆，可能会出现较大的零序电流，因而影响零序电流保护的正确工作，此时应从整定计算上予以考虑，或在单相重合闸动作过程中使其短时退出工作。

3）不同电压等级网络相连时整定复杂

当采用自耦变压器联系两个不同电压等级的电网(如110kV 和 220kV 电网)时，则在任一电网中发生接地短路时都会在另一电网中产生零序电流，这使得零序电流保护的整定配合复杂化，并增大了零序三段保护的动作时限。

2.3.6 零序电流保护整定计算举例

[例 2.2] 如图 2.43（a）所示系统，已知 A 母线处发电机和变压器采用单元接线方式（停运时发电机和变压器同时停运）；B 母线处两台负荷变压器可能两台都采用中性点接地运行方式，也可能采用只有一台中性点接地运行方式。计算保护 2 和保护 1 的零序 I 段整定值及它们零序 I 段的最小动作范围。系统电压为 115kV，可靠系数取 1.2，系统中各元件及线路的负序阻抗和正序阻抗相同，其它参数见图中所示。

解：先根据系统运行情况及各元件参数画出等值序网图。图 2.43（b）为两台发电机变压器都运行，B 母线处两台负荷变压器均接地运行时的等值序网图；图 2.43（c）为为两台发电机变压器都运行，但 B 母线上负荷变压器只有一台接地运行时的等值序网图；图 2.43（d）和(e)分别为发电机变压器组只有一台运行，B 母线处负荷变压器两台或单台中性点接地运行时的等值序网图。

(1) 计算保护 2 零序 I 段定值

按整定原则应选择在 C 母线上发生单相或两相接地时出现的最大零序电流。对于保护 2 显然应选择图 2.43（b）序网图对应的运行方式，此时流过保护 2 的零序电流最大，先计算从 C 母线看人的各序综合阻抗。

$$Z_{1\Sigma C} = Z_{2\Sigma C} = (20+10)//(20+10)+20+20=55\,\Omega$$

$Z_{0\Sigma C}$ = ((10//10)+40)//(60//60)+40=58 Ω

根据电力系统分析可知，发生单相接地和两相接地时的零序电流可分别由以下两式计算：

$$I_{0.k}^{(1)} = E_{\varphi}/(Z_{1\Sigma C} + Z_{2\Sigma C} + Z_{0\Sigma C}) = E_{\varphi}/(2Z_{1\Sigma C} + Z_{0\Sigma C})$$

$$I_{0.k}^{(1,1)} = \frac{E_{\varphi}}{Z_{1\Sigma C} + \dfrac{Z_{2\Sigma C} \times Z_{0\Sigma C}}{Z_{2\Sigma C} + Z_{0\Sigma C}}} \times \frac{Z_{2\Sigma C}}{Z_{2\Sigma C} + Z_{0\Sigma C}} = \frac{E_{\varphi}}{Z_{1\Sigma C} + 2Z_{0\Sigma C}}$$

上两式已利用了条件 $Z_{1\Sigma C} = Z_{2\Sigma C}$，所以对此系统中无论故障点位于何处，以上两式始终成立。由此可见，当 $Z_{1\Sigma C} < Z_{0\Sigma C}$ 时，则有 $I_{0.k}^{(1)} > I_{0.k}^{(1,1)}$，即单相接地故障时的零序电流为最大；反之，$Z_{1\Sigma C} > Z_{0\Sigma C}$ 时，则有 $I_{0.d}^{(1)} < I_{0.d}^{(1,1)}$。在此,因 $Z_{1\Sigma C} < Z_{0\Sigma C}$，故应选择 C 母线上发生单相接地故障时的零序电流，对不同的故障点，只需以该点看人的零序综合阻抗代替即可。

$$I_{0.k.\max}^{(1)} = E_{\varphi}/(2Z_{1\Sigma C} + Z_{0\Sigma C}) = \frac{115\sqrt{3}}{2 \times 55 + 58} = 0.3952\ \text{kA}$$

由此可得保护 2 的 I 段动作电流为：$I_{0.k2}^{\text{I}}$=1.2×3×0.3952=1.4227 kA

计算最小动作范围时应选择使流过保护 2 的零序电流为最小的系统条件（故障类型）。对于保护 2 而言，很显然应选择在 A 母线上单台机组运行，B 母线上负荷变压器单台接地运行时的系统条件，对应的等值序网图如图 2.43（e）所示。

设最小动作范围为线路 BC 总长的 K 倍，则在此范围末端短路时各序的等值阻抗为：

$$Z_{1\Sigma K} = Z_{2\Sigma K} = 20+10+20+20K = 50+20K$$

$$Z_{0\Sigma K} = (10+40)//60+40K = 27.27+40K$$

当 K 在 0～1 之间时，始终有 $Z_{1\Sigma K} > Z_{0\Sigma K}$，故有 $I_{0.k}^{(1)} < I_{0.k}^{(1,1)}$，即应选择单相接地故障计算。在保护范围末端短路应满足 $3I_0^{(1)}$ 等于保护的整定值，因此，可得

$$I_{0.K2} = 3E_{\varphi}/(2Z_{1\Sigma C} + Z_{0\Sigma C})$$

代入相应值，可解得 K=0.159=15.9%

即保护 2 的最小保护范围为线路全长的 15.9%

(2) 计算保护 1 的零序 I 段定值

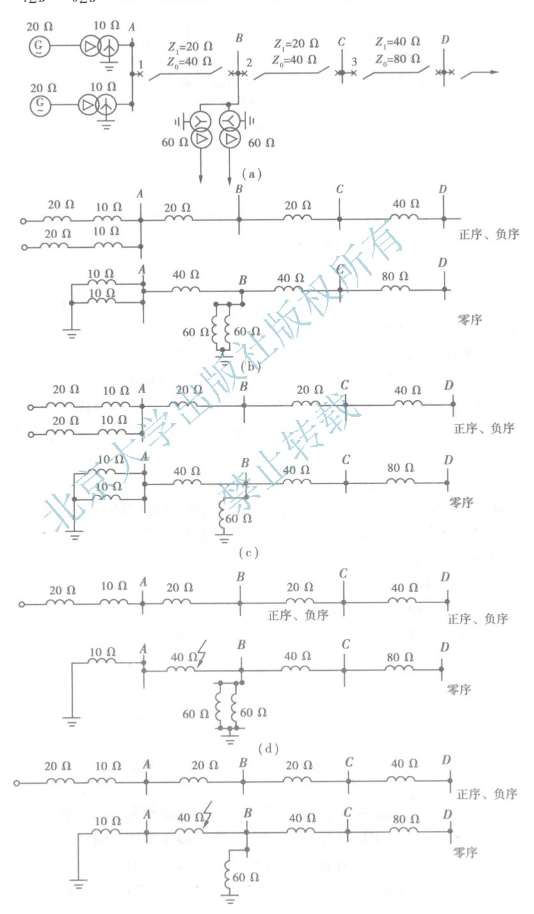
此时应选择 B 母线发生接地故障，显然 A 母线上发电机组选择为两台运行，但 B 母线上负荷变压器的中性点接地数必须经过计算后才能确定。所以应分别考虑图 2.43（b）和(c)对应的情况。

1) 图 2.43（b）对应的系统条件时

$$Z_{1\Sigma B} = (20+10)//(20+10)+20 = 35\ \Omega$$

$$Z_{0\Sigma B}=((10//10)+40)//(60//60)=18\ \Omega$$

由于 $Z_{1\Sigma B}>Z_{0\Sigma B}$，故应选择两相接地故障类型来计算。



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

图 2.43 大电流接地系统零序电流保护整定例图

（a）系统图 ； （b）-（d）不同运行方式下的正序、负序、零序等值序网图

$$I_{0.\mathrm{Bk.max}}^{(1,1)} = \frac{E_{\varphi}}{Z_{1\sum B} + 2Z_{0\sum B}} = 0.935\ \mathrm{kA}$$

流经保护 1 的等序电流值为

$$I_{0.\mathrm{Bk1}} = I_{0.\mathrm{Bk.max}}^{(1,1)} \times \frac{60}{45+60} = 0.374\ \mathrm{kA}$$

2) 图 2.43（c）对应的系统条件时

$$Z_{1\sum B} = (20+10)//(20+10)+20 = 35\ \Omega$$

$$Z_{0\sum B} = ((10//10)+40)//60 = 25.71\ \Omega$$

由于 $Z_{1\sum B} > Z_{0\sum B}$，故也应选择两相接地故障方式。

$$I_{0.\mathrm{Bk.max}}^{(1,1)} = \frac{E_{\varphi}}{Z_{1\sum B} + 2Z_{0\sum B}} = 0.7683\ \mathrm{kA}$$

流经保护 1 的电流为

$$I_{0.\mathrm{Bk1}} = I_{0.\mathrm{Bk.max}}^{(1,1)} \times \frac{60}{45+60} = 0.439\ \mathrm{kA}$$

由 1）、2）计算可见，虽然后一种情况故障点总电流小于前一种，但流经保护 1 的零序电流却在后一种情况下最大。因此，保护 1 的整定值应按躲过此最大电流来整定，即

$$I_{0.\mathrm{K1}} = 1.2 \times 3 \times 0.439 = 1.58\ \mathrm{kA}$$

计算保护 1 的最小动作范围时，A 线上发电机变压器组应选择为单台运行，但同样在 B 母线负荷变压器中性点接地数目仍需通过计算来确定。同样假设最小保护范围为线路 AB 长的 K 倍，故可对应不同的系统条件进行计算：

3) 对应于系统条件图 2.43(d)的情况

在此范围末端短路时，有

$$Z_{1\sum K} = 20+10+20K = 30+20K$$

$$Z_{0\sum K} = (10+40K)//((1-K)\times 40+30) = \frac{(1+4K)\times(70-40K)}{8}$$

当 $0 \leqslant K \leqslant 1$ 时，始终有 $Z_{1\sum K} > Z_{0\sum K}$，故单相接地故障电流为最小也即保护范围为最小的情况。在保护范围末端短路时，流经保护 1 的 3 倍零序电流等于其起动电流，即

$$\frac{E_{\varphi}}{2Z_{1\sum K} + Z_{0\sum K}} \times \frac{70-40K}{80} = I_{0.\mathrm{K1}}^{1}$$

由此可得

$$\frac{\sqrt{3}\times115}{2\times(30+20K)+(1+4K)(70-40K)/8}\times\frac{7-4K}{8}=1.5804$$

整理得　　　$160K^2-1064.14K+332.245=0$

解得　　　$K=\dfrac{1064.14\pm\sqrt{1064.14^2-4\times160\times332.245}}{2\times160}=\dfrac{1064.14\pm95.04}{320}$

由于 K 的取值范围只能为 $0\leqslant K\leqslant1$，故取

$K=0.3284=32.84\%$

即最小保护范围为线路全长的 32.84％.

4)　图 2.43(e)对应的系统条件下

同理有

$Z_{1\Sigma K}=30+20K$

$Z_{0\Sigma K}=(10+40K)//((1-K)\times40+60)=\dfrac{(1+4K)(100-40K)}{11}$

当 K 在 $0\leqslant K\leqslant1$ 时，始终有 $Z_{1\Sigma K}>Z_{0\Sigma K}$，因此，单相接地故障为保护范围最小的故障类型。类似的可得到下属方程

$$\frac{3E_{\varphi}}{2Z_{1\Sigma K}+Z_{0\Sigma K}}\times\frac{100-40K}{110}=I^{1}_{0.bh1}$$

带入各参数的表达式并整理后可得　　$160K^2-1304.14K+500.35=0$

可知具有实际意义的 K 值为　　　$K=40.36\%$

即在此种情况下保护 1 的最小保护范围为线路全长的 40.36％。比较此两种场合下计算的 K 值可知，保护 1 的最小保护范围出现在图 2.43（d）对应的系统条件下发生单相接地故障的情况，此时保护范围为线路全长的 32.84％。

[例 2. 3]　系统参数同及线路参数同例 2.2，但 B 线上负荷变压器始终保持两台中性点都接地运行。整定保护 1 和保护 2 的零序电流 II 段的定值，并算出其灵敏系数。(取 $K^{\mathrm{I}}_{\mathrm{rel\,k}}=1.2$，$K^{\mathrm{II}}_{\mathrm{rel}}=1.1$)。

解：(1)　整定保护 2 的 II 段定值并计算灵敏系数

由于保护 2 的 II 段应与下条线路的保护即保护 3 的 I 段相配合，因此，先应整定保护 3 的 I 段定值。保护 3 的 I 段定值应按躲过 D 母线上发生接地故障时出现的最大零序电流来整定，很明显在图 2. 43（b）对应的方式下将出现最大的零序电流。在 D 母线上发生故障时

$$Z_{1\Sigma D}=(20+10)//(20+10)+20+20+40=95\Omega$$

$$Z_{0\Sigma D}=[(10//10)+40]//(60//60)+40+80=138\Omega$$

由于 $Z_{1\Sigma D} < Z_{0\Sigma D}$，故在发生单相接地时零序电流将为最大，即

$$I_{0.\text{Dk.max}}^{(1)} = \frac{E_{\varphi}}{Z_{1\Sigma D} + 2Z_{0\Sigma D}} = 0.2024\,\text{kA}$$

所以有 $I_{0.\text{K3}} = 1.2 \times 3 \times 0.2024 = 0.7286\,\text{kA}$

因此，保护 2 的零序电流Ⅱ段应整定为

$$I_{0.\text{K2}} = 1.1 \times 0.7628 = 0.8015\,\text{kA}$$

保护 2 的Ⅱ段时限应整定为 t_2^{11}= 0.5s。

(2) 保护 2 的零序电流Ⅱ段的灵敏系数计算，应选择在 C 线发生接地故障时可能出现的最小零序电流来校验。由于 B 母线上两台变压器中性点均接地，所以使保护 2 在 C 母线上短路时流过最小零序电流应出现在图 2.43（d）对应的系统方式。此时有

$$Z_{1\Sigma C} = 20 + 10 + 20 + 20 = 70\Omega$$

$$Z_{0\Sigma C} = (10 + 40) // (60 // 60) + 40 = 58.75\Omega$$

可见，$Z_{1\Sigma D} > Z_{0\Sigma D}$，故发生 $K^{(1)}$时为零序电流最小的情况，所以

$$I_{0.\text{Ck.min}}^{(1)} = \frac{3E_{\varphi}}{2Z_{1\Sigma C} + 2Z_{0\Sigma C}} = \frac{115\sqrt{3}}{2 \times 70 + 58.75} = 0.3341\,\text{kA}$$

由此可求出保护 2 零序Ⅱ断的灵敏系数

$$K_{\text{sen}} = \frac{3I_{0Ck.\min}}{I_{0.K}^{11}} = \frac{3 \times 0.3341}{0.8015} = 1.251$$

确定保护 1 的Ⅱ段定值并计算灵敏系数

保护 1 的零序电流Ⅱ段应与保护 2 的零序电流Ⅰ相配合，应躲过其保护范围末端短路时分流到保护 1 的最大计算电流来整定。由例 1 的计算值有保护 2Ⅰ段定值为 1.4227 kA，因此，可计算出分流到保护 1 的最大零序电流为

$$3I_{0.\text{r1}} = 1.4227 \times \frac{30}{45 + 30} = 0.5691\,\text{kA}$$

故保护 1 的零序电流Ⅱ段应整定为

$$I_{0.\text{set}}^{\text{II}} = 1.1 \times 0.5691 = 0.626\,\text{kA}$$

同样保护 1 的Ⅱ段时限应整定为 0.5s。

保护 1 的零序电流Ⅱ的灵敏度应按在 B 母线发生接地故障时流到保护 1 的最小零序电流来校验。根据系统的运行方式，可见只能按图 2.43（d）对应的方式计算。此时

$$Z_{1\Sigma B} = 20 + 10 + 20 = 50\Omega$$

$$Z_{0\Sigma B} = (10 + 40) // (60 // 60) = 18.75\Omega$$

因为 $Z_{1\Sigma B} > Z_{0\Sigma B}$，故应选取发生 $K^{(1)}$时分流到保护 1 的电流来校验：

$$I_{0.\mathrm{Bk.min}}=\frac{E_{\varphi}}{2Z_{1\Sigma\mathrm{B}}+Z_{0\Sigma\mathrm{B}}}\times\frac{30}{50+30}=\frac{115\sqrt{3}}{2\times50+18.75}\times\frac{30}{80}=0.2097\,\mathrm{kA}$$

因此，保护 1 的Ⅱ段灵敏系数为

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{3I_{0.\mathrm{Bk.min}}}{I_{0.\mathrm{k1}}^{11}}=\frac{3\times0.2097}{0.626}=1.005$$

2.4　小电流接地系统的单相接地保护

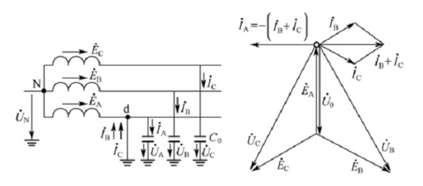
所谓小电流接地系统，是指中性点非直接接地系统，即指中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。在这种系统中，发生单相接地时，因构不成短路回路，在故障点上流过比负荷电流小得多的电流，所以称为小电流接地系统。在我国，3kV～35 kV 的电网主要采用中性点非直接接地方式。

在小电流接地系统中，发生单相接地时，除故障点电流很小外，三相之间的线电压仍然保持对称，对负载的供电没有影响，所以在一般情况下都允许再继续运行 2h。在此期间，其他两相的对地电压要升高 $\sqrt{3}$ 倍，为了防止故障的进一步扩大造成两相或三相短路，应及时发出信号，以便运行人员查找发生接地的线路，采取措施予以消除。这也是采用小电流接地系统的主要优点。所以在单相接地时，一般只要求继电保护能选出发生接地的线路并及时发出信号，而不必跳闸。但当单相接地对人身和设备的安全有危险时，则应动作于跳闸。

2.4.1　中性点不接地系统中单相接地故障的特点

中性点不接地的简单网络如图 2.44(a)所示。在正常运行情况下，三相有相同的对地电容 C_0，三相的对地电压是对称的，中性点对地电压 $\dot{U}_{\mathrm{N}}=0$，在相电压的作用下，各相的电容电流也是对称的，且超前各自的相电压 90°。这时，三相对地电压之和与三相电容电流之和均为零，电网无零序电压和零序电流。

假设 A 相发生单相接地短路，A 相对地电压为零，对地电容被短接，电容电流为零，而其他两相的对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，对地电容电流也相应增大 $\sqrt{3}$ 倍，其相量关系如图 2.44(b)所示。



(a)　网络图　　　　(b)　A 相接地故障时相量图

图 2.44　中性点不接地系统单相接地

在不计负荷电流和电网压降时，电网中性点对地电压和各相对地电压为

$$\left.\begin{aligned}&\dot{U}_{N}=-\dot{E}_{A}\\&\dot{U}_{A0}=0\\&\dot{U}_{B0}=\dot{E}_{B}-\dot{E}_{A}=\sqrt{3}\dot{E}_{A}\ e^{-j150^{\circ}}\\&\dot{U}_{C0}=\dot{E}_{C}-\dot{E}_{A}=\sqrt{3}\dot{E}_{A}\ e^{j150^{\circ}}\end{aligned}\right\}\tag{2-43}$$

在接地点处出现的零序电压为

$$\dot{U}_{0}=\frac{1}{3}\left(\dot{U}_{A}+\dot{U}_{B}+\dot{U}_{C}\right)=-\dot{E}_{A}=\dot{U}_{N}\tag{2-44}$$

A 相接地时，A 相对地电容电流为零，而非故障相在对地电压的作用下，分别产生超前 90° 的电容电流，即

$$\left.\begin{aligned}&\dot{I}_{B}=j\omega C_{0}\dot{U}_{B0}\\&\dot{I}_{C}=j\omega C_{0}\dot{U}_{C0}\end{aligned}\right\}\tag{2-45}$$

此时，通过故障相 A 接地点处的电流是系统非故障相电容电流之和，即

$$\dot{I}_{A}=-(\dot{I}_{B}+\dot{I}_{C})=-j\omega C_{0}\left(\dot{U}_{B0}+\dot{U}_{C0}\right)=-j3\omega C_{0}\dot{U}_{0}\tag{2-46}$$

其有效值为 $I_{A}=3\omega C_{0}U_{0}$，是正常运行时单相电容电流的 3 倍。

而通过保护安装处的零序电流为

$$3\dot{I}_{0}=\dot{I}_{A}+\dot{I}_{B}+\dot{I}_{C}=0\tag{2-47}$$

由上可知，在发生单相接地短路时，非故障相电压升高至原来的 $\sqrt{3}$ 倍，电源中性点对地电压等于零序电压，零序电压的相量与故障相电势的相量大小相等方向相反。

单电源多线路中性点不接地电网如图 2.45(a)所示，假设线路 3 的 A 相 k 点接地，则该电网 A 相被短接，整个电网的 A 相对地电压和对地电容电流都为零，而非故障相的对地电容电流通过大地、接地点、电源和线路构成回路。

所以通过非故障线路保护安装处的各相对地电容电流为

$$\left.\begin{aligned}&\dot{I}_{B1}=j\omega C_{01}\dot{U}_{B0}\\&\dot{I}_{C1}=j\omega C_{01}\dot{U}_{C0}\\&\dot{I}_{A1}=0\end{aligned}\right\}\tag{2-48}$$

通过非故障线路保护安装处的零序电流为

$$3\dot{I}_{01}=\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1}=j3\omega C_{01}\dot{U}_{0}\tag{2-49}$$

其相量关系如图 2.45(b)所示，其有效值为

$$3I_{01}=3\omega C_{01}U_{0}\tag{2-50}$$

通过故障线路保护安装处的各相对地电容电流为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{B3} &= j\omega C_{03}\dot{U}_{B0}\\ \dot{I}_{C3} &= j\omega C_{03}\dot{U}_{C0}\\ \dot{I}_{A3} &= -\left(\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1}+\dot{I}_{B2}+\dot{I}_{C2}+\dot{I}_{B3}+\dot{I}_{C3}\right)\end{aligned}\right\} \tag{2-51}$$

通过故障线路保护安装处的零序电流为

$$\begin{aligned}3\dot{I}_{03} &= \dot{I}_{A3}+\dot{I}_{B3}+\dot{I}_{C3} = -\left(\dot{I}_{B1}+\dot{I}_{C1}+\dot{I}_{B2}+\dot{I}_{C2}\right) = -\left(3\dot{I}_{01}+3\dot{I}_{02}\right)\\ &= -j3\omega\left(C_{01}+C_{02}\right)\dot{U}_0 = -j3\omega C_{0\Sigma}\dot{U}_0\end{aligned} \tag{2-52}$$

其相量关系如图 2.45(c)所示，其有效值为

$$3I_{03} = 3\omega C_{0\Sigma}U_0 \tag{2-53}$$

综上所述，中性点不接地电网单相接地短路时零序分量的特点如下：

(1) 接地相对地电压为零，非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，电网出现零序电压，电源中性点对地电压等于零序电压，零序电压的相量与故障相电势的相量大小相等方向相反。

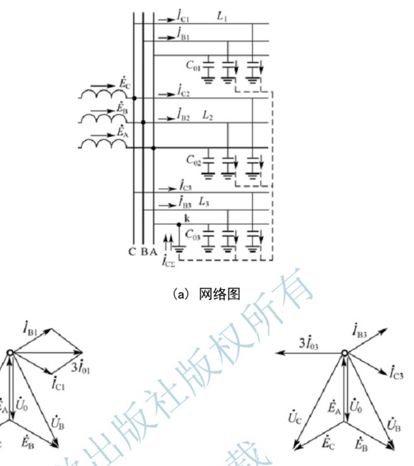
(2) 单电源单线路中性点不接地电网的线路上任一点接地时，通过保护安装处的零序电流为零。

(3) 单电源多线路中性点不接地电网的线路上任一点接地时，通过非故障线路的保护安装处的零序电流 $3\dot{I}_0$ 为该线路非故障相对地电容电流之相量和，其数值为 $3\omega C_0U_0$（即为一条线路的非故障相对地电容电流的相量和），并超前零序电压 $90°$ 。

(4) 单电源多线路中性点不接地电网的线路上任一点接地时，通过故障线路的保护安装处的零序电流 $3\dot{I}_0$ 为所有非故障线路零序电流之和，其数值为 $3\omega C_{0\Sigma}U_0$ ，并滞后零序电压 $90°$ 。

(5) 接地点流过的电流为电网各元件对地电容电流之和，即 $\dot{I}_{C\Sigma} = j3\omega C_{0\Sigma}\dot{U}_0$ 。

这些特点是构成中性点不接地电网接地保护的依据。



(a) 网络图

(b) 非故障线路电流与电压相量图　　　(c) 故障线路电流与电压相量图

图 2.45　单电源多线路中性点不接地电网单相接地时电流电压分析图

2.4.2　中性点不接地系统的接地保护

根据中性点不接地系统单相接地的特点以及电网的具体情况，对中性点不接地系统的单相接地保护可以采用以下几种方式。

1. 绝缘监视装置

利用单相接地时出现的零序电压的特点，可以构成无选择性的绝缘监视装置，其原理接线如图 2.46 所示。

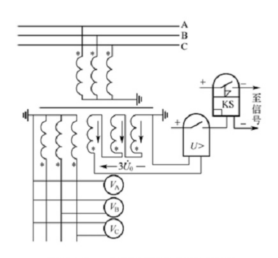


图 2.46　绝缘监测装置接线图

在发电厂或变电所的母线上，装有一套三相五柱式电压互感器，其二次侧有两组线圈，一组接成星形，在它的引出线上接三只电压表(或一只电压表加一个三相切换开关)，用于测量各相电压(注意：电压表的额定工作电压应按线电压来选择)；另一组接成开口三角形，并在开口处接一只过电压继电器，用于反应接地故障时出现的零序电压，并动作于信号。

正常运行时，系统三相电压对称，没有零序电压，所以三只电压表读数相等，过电压继电器不动作。当变电所母线上任一条线路发生接地时，接地相电压变为零，该相电压表读数变为零，而其他两相的对地电压升至原来的$\sqrt{3}$倍，所以电压表读数升高。同时出现零序电压，使过电压继电器动作，发出接地故障信号。工作人员根据信号和表针指示，就可以判别出发生了接地故障和故障的相别，即知道哪一相接地了。但却不知道是哪一条线路的该相发生了接地故障。因为当该电网发生单相接地短路时，处于同一电压等级的所有发电厂和变电所母线上，都将出现零序电压，所以该装置发出的信号是没有选择性的。这时可采用由运行人员依次短时断开每条线路的方法(可辅以自动重合闸，将断开线路投入)来寻找故障点所在线路。如断开某条线路时，系统接地故障信号消失，则被断开的线路就是发生接地故障的线路。找到故障线路后，就可以采取措施进行处理，如转移故障线路负荷，以便停电检查。

在电网正常运行时，由于电压互感器本身有误差以及高次谐波电压的存在，开口三角形处会有不平衡电压输出。所以，过电压继电器的动作电压应躲过这一不平衡电压，一般整定为15V。

2. 零序电流保护

利用故障线路零序电流大于非故障线路零序电流的特点，可以构成有选择性的零序电流保护，并根据需要动作于信号或跳闸。

对于架空线路，采用零序电流过滤器的接线方式，即将继电器接在完全星形接法的中线上，如图 2.47 所示。

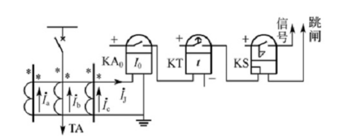


图 2.47 架空线路用零序电流保护原理图

对于电缆线路，采用零序电流互感器的接线方式，如图 2.48 所示。

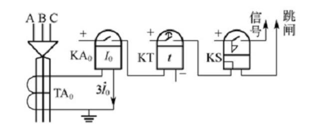


图 2.48 电缆线路用零序电流保护原理接线图

根据对图 2.45 的分析，当某一线路上发生单相接地时，非故障线路上的零序电流为本身的电容电流，因此，为了保证动作的选择性，保护装置的动作电流应大于本线路的电容电流，即

$$I_{KA\cdot OP}=K_{rel}3U_N\omega C_0 \tag{2-54}$$

式中　K_{rel}——可靠系数，它的大小与保护动作时间有关，如瞬时动作，为防止因暂态电容电流而误动，一般取 4～5；如保护延时动作，可取 1.5～2。

U_N——电网故障前的相电压；

C_0——被保护线路每相对地电容。

按式(2-54)整定 $I_{KA\cdot OP}$ 时，若不能躲过本线路外部三相短路时出现的最大不平衡电流，则必须用延时来保证选择性，其时限必须比下一条线路相间短路保护动作时限大 Δt 。

保护的灵敏系数按被保护线路发生单相接地短路时，流过保护的最小零序电流来校验。由于流经故障线路的零序电流为全网络中非故障线路的电容电流之和，可用 $3U_P\omega(C_{0\Sigma}-C_0)$ 表示，所以灵敏系数为

$$K_{sen}=\frac{3U_P\omega(C_{0\Sigma}-C_0)}{K_{rel}3U_P\omega C_0}=\frac{C_{0\Sigma}-C_0}{K_{rel}C_0} \tag{2-55}$$

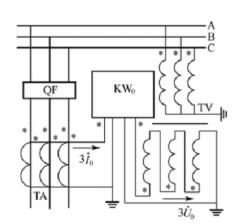
式中　$C_{0\Sigma}$——电网在最小运行方式下各线路每相对地电容之和。

显然，当网络出线越多时，$C_{0\Sigma}$ 值越大，越容易满足灵敏系数的要求。对架空线路，要求 $K_{sen}\geqslant1.5$；对于电缆线路，要求 $K_{sen}\geqslant1.25$。

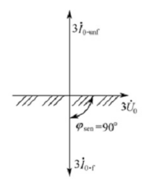
3. 零序方向保护

利用故障线路与非故障线路零序电流方向不同的特点，可以构成有选择性的零序功率方向保护，动作于信号或跳闸。当网络出线较少时，非故障线路零序电流与故障线路零序电流差别可能不大，采用零序电流保护灵敏度很难满足要求，则可采用零序方向保护。

因为中性点不接地电网发生单相接地时，非故障线路零序电流超前零序电压 90°，故障线路零序电流滞后零序电压 90°，所以，采用零序方向继电器可以明显区分故障线路与非故障线路。零序方向保护的原理接线如图 2.49(a)所示，零序功率方向元件的最大灵敏角为 $\varphi_{sen}=90°$，采用正极性接入方式接入 $3\dot{U}_0$ 和 $3\dot{I}_0$ 。以电压为参考量，给出 $3\dot{I}_0$ 的动作区如图 2.49(b)所示。



(a) 零序功率方向元件接线图



(b) 零序方向元件动作区

图 2.49 中性点不接地电网零序电流方向保护

当网络发生单相接地故障时，故障线路的零序电流$3\dot{I}_{0\cdot f}$由线路流向母线，其相位滞后于零序电压90°，落入继电器动作区的最大灵敏线上，所以方向元件动作，使保护灵敏地动作。而非故障线路的零序电流$3\dot{I}_{0\cdot unf}$则落入非动作区，方向元件不动作，则保护不动作。所以该保护的动作是有选择性的。

为了提高零序方向保护动作的可靠性和灵敏性，可以考虑仅在发生接地故障时，零序电流元件动作并延时 50～100ms 之后，才开放方向元件的相位比较回路，如图 2.50 所示的框图。

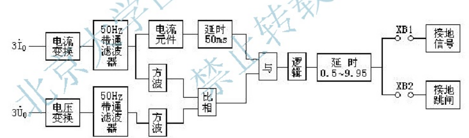


图 2.50 构成零序电流方向保护的原理框图

其中零序电流元件的起动电流按躲开相间短路时零序电流互感器的不平衡电流整定，而与被保护元件自身电容电流的大小无关，既简化了整定计算，又极大地提高了保护的灵敏性。

对零序方向元件的灵敏角可选择与$\varphi_{sen.\max}=90°$，即$3\dot{U}_0$超前$3\dot{I}_0$ 90°时动作最灵敏，动作范围为$\varphi_{sen.\max}\pm(80°\sim90°)$。

采用零序电流元件控制零序方向元件比相回路这个方案的特点是：

（1）只在发生接地故障时才将方向元件投入工作，提高了工作的可靠性；

（2）不受正常运行及相间短路时零序电压及零序电流过滤器不平衡输出的影响；

（3）电流元件动作后延时 50～100ms 开放方向元件的比相回路，可有效地防止单相接地瞬间过渡过程对方向元件的影响；

（4）当区外故障时，流过保护的电流是被保护元件自身的电容电流，方向元件可靠不

动作。

2.4.3　中性点经消弧线圈接地系统的特点

由图 2.45 可知，当 A 相发生接地故障时，通过故障点的电流等于系统总的电容电流，其值为

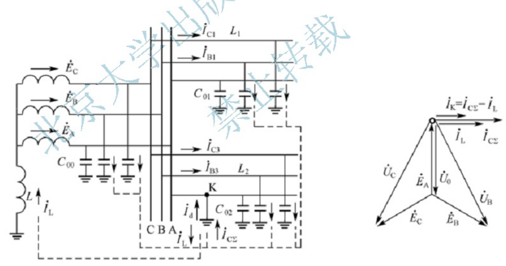
$$\dot{I}_{K}=\dot{I}_{C\Sigma}=-j3\omega C_{0\Sigma}\dot{U}_{0}=-j3\omega C_{0\Sigma}\dot{E}_{A} \tag{2-56}$$

所以，接地点的电流 I_K 与 $C_{0\Sigma}$ 成正比。在系统电压等级一定的情况下，系统越大，$C_{0\Sigma}$ 就越大，则 I_K 也越大。当 I_K 达到一定值时，就会在接地点燃起电弧，引起弧光过电压，从而使非故障相对地电压进一步升高，造成绝缘损坏，形成两点或多点接地短路，以致发展为停电事故。为解决这一问题，可在电源中性点接一电感 L，如图 2.51(a)所示。当线路 L_2 的 A 相接地时，通过电感 L 的电流为

$$\dot{I}_{L}=\frac{\dot{E}_{A}}{j\omega L}=-\frac{j\dot{E}_{A}}{\omega L} \tag{2-57}$$

其电流与电压之间的相位关系如图 2.51(b)所示。此时通过故障点的电流为

$$\dot{I}_{K}=\dot{I}_{C\Sigma}-\dot{I}_{L}=-j3\omega C_{0\Sigma}\dot{E}_{A}+j\frac{\dot{E}_{A}}{\omega L}=-j3\dot{E}_{A}(\omega C_{0\Sigma}-\frac{1}{3\omega L}) \tag{2-58}$$



(a) 电流分布图　　　　(b) 电流电压相量图

图 2.51　中性点经消弧线圈接地电网单相接地时电流分布与相量图

由式(2-58)可知，选择适当大小的电感 L，可以使单相接地时，流经故障点的电流 I_K 减小到零，因此，通常称该电感线圈为消弧线圈。

在我国，对于 3kV ～ 6kV 电网，当发生单相接地故障时，通过故障点总的电容电流超过 30A，对于 10kV 电网超过 20A，对于 22kV ～ 66kV 电网超过 10A 时，都要求装设消弧线圈。

因为变压器中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时，故障电流也很小，所以它也属于小电流接地系统。

2.4.4 补偿方式

消弧线圈的作用就是用电感电流来补偿流经接地点的电容电流。根据人为对电容电流补偿程度的不同，可分为完全补偿、欠补偿和过补偿三种方式。

1. 完全补偿

完全补偿就是使$I_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{C}\Sigma}$，从而使$I_{\mathrm{K}}=0$的方式。从消除故障点电弧，避免出现弧光过电压的角度来说，这种补偿方式是最好的。但从另一方面来说，则存在严重缺点，因为完全补偿时，$\omega L=\dfrac{1}{3\omega C_{0\Sigma}}$正是引起串联谐振的条件，如图 2.52 所示。

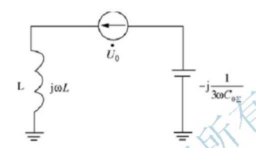


图 2.52　产生串联谐振的零序等效电网

如果正常运行时三相对地电容不完全相等，则在消弧线圈开路的情况下电源中性点对地之间就会产生一个偏移电压即零序电压$\dot{U}_0$。此外，在断路器三相触头不同时闭合或断开时，也将短时出现一个数值更大的零序分量电压。$\dot{U}_0$电压将在串联谐振回路中产生很大的电流，此电流在消弧线圈上又会产生很大的电压降，从而使电源中性点对地电压严重升高。这是不允许的，因此，在实际上是不能采用完全补偿方式的。

2. 欠补偿

欠补偿就是使$I_{\mathrm{L}}<I_{\mathrm{C}\Sigma}$的补偿方式，补偿后的接地点电流仍然是电容性的。采用这种方式时，仍然不能避免上述问题的发生。因为当系统运行方式变化时，例如某个元件被切除或因发生故障而跳闸，则电容电流就将减小，这时很可能又出现$I_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{C}\Sigma}$的情况，从而又引起过电压。因此，欠补偿方式一般也是不采用的。

3. 过补偿

过补偿就是使$I_{\mathrm{L}}>I_{\mathrm{C}\Sigma}$，补偿后流过故障点的电流是感性的。采用这种补偿方式不可能发生串联谐振的过电压问题，因此，这种方式在实际中得到了广泛的应用。

I_{L}大于$I_{\mathrm{C}\Sigma}$的程度用过补偿度P来表示，其关系为

$$P=\frac{I_{\mathrm{L}}-I_{\mathrm{C}\Sigma}}{I_{\mathrm{C}\Sigma}} \tag{2-59}$$

一般选择过补偿度$P=5\%\sim10\%$。

在过补偿情况下，通过故障线路保护安装处的电流为补偿以后的感性电流，它与$\dot{U}_0$的相位关系和非故障线路容性电流与$\dot{U}_0$的相位关系相同，在数值上较小。因此，在这种情况下，无法利用零序功率方向的差别来判别故障线路，也不能利用零序电流的大小来找出故

障线路(因灵敏度很难满足要求)，即零序电流保护和零序方向保护已不适用。

2.4.5 中性点经消弧线圈接地系统的接地保护

在中性点经消弧线圈接地的电网中，一般采用过补偿运行方式。所以零序电流保护和零序方向保护已不再适用。因此，长期以来，这一直是人们探索研究的一个难题。

近年来，随着微机在电力系统及其自动化和继电保护领域的广泛应用，也使这个难题的解决取得了突破性的成果，现简要介绍如下。

(1) 逐条断开线路判断故障。

采用图 2.46 所示的绝缘监视装置，在单相接地时发出信号，然后由运行人员依次短时断开每条线路进行查找。

(2) 利用单相接地故障瞬间过渡过程的首半波构成保护。

在国内，自 1958 年以来就提出用暂态过程中的首半波实现接地保护的原理及保护装置，但根据单相接地过渡过程的特点，在过渡过程中，电容电流的峰值大小与发生接地故障瞬间相电压的瞬时值有关，因此，很难保证保护装置的可靠动作。

(3) 利用过渡过程中的小波变换方法构成接地选线的保护。

它主要是利用接地过渡过程中电压、电流所含有的谐波分量信息进行精确分析，特别是对暂态突变信号和微弱信号的变化很敏感，能可靠地提取出故障特征。有关小波变换在继电保护中的应用可参考相关资料。

另外还有其他一些方法，具体实现原理可参考相关资料。

目前现场使用的微机型线路保护屏如图 2.53 所示。



图 2.53 微机型线路保护屏

【本章小结】介绍了继电器原理、分类、组成及其特性。重点介绍了三段式电流保护的

实现原理、整定计算原则、动作时限特性、灵敏度校验及各段之间的配合关系；同时介绍了相间短路的方向性保护、三段式零序电流保护的工作原理及整定原则；最后对中性点不接地、经消弧线圈接地系统中零序电流的特点、实现方法等予以介绍。

【关键词】主保护 Main Protection；后备保护 Backup Protection；灵敏系数 Sensitivity Coefficient；返回系数 Return Ratio

【阅读材料】

目前继电保护需要解决的问题

继电保护微机化已成定局，这将给这个本来就充满技术与艺术的行业带来新的天地，目前应注重从以下方面开展工作。

1. 新原理、新技术的应用

微机化的继电保护不应该再单纯停留在为传统继保的“翻译”上了，要开发新原理，比如工频变化量、行波、网络化保护、小波应用、自适应、广域保护等，同时应充分利用微机的优势，将保护配置方案优化，实现100%可靠的选择性。

2. 软件开发标准化

现在就微机保护而言，EMC的标准已经很成熟，但就装置的型号管理、软件功能、软件开发规范还没有完善的指导性规范，导致市场，特别是中低压市场纷乱无序，好多产品不具有通用性。如果有软件开发规范做指导，就会使厂家少走弯路，也能为市场提供更完善的产品。

3. 为智能化电网建设而实现接口标准化

为迎合大电网建设的需要，为适应国际化市场竞争，各厂家装置接口标准化势在必行。IEC61850应作为行业的准入门槛。这个接口标准化，不再单纯是传统意义上的通讯接口，而应在模量输入接口、数字I/O接口、装置内部逻辑接口等方面均应实现标准化。

4. Web管理

充分利用internet,利用系统内部网，实现对装置的web管理，提高效率。

5. 功能扩展性

目前，国外诸如ABB、GE、SIEMENS、SEL等公司产品都有逻辑编程功能，可以实现功能的扩展，这也应该是国内产品可以学习的。另外，国外产品在逻辑编程环节有一个弱点就是应用时序慢，造成有些功能不能很好应用，这也是我们国内产品发展可以考虑完善的地方。

6. 与新能源、新技术的结合

随着风力、太阳能等分布式能源的迅速发展，开发适应新能源产业的保护、控制、稳定监测等产品尤为必要，同时，还应考虑适用柔性送电技术要求的保护装置。

资料来源：电力技术， 远征

习　题

2.1 填空题

1. 阶段式电流保中，无时限电流速断保护是靠选择______来保证选择性，带时限电流

速断保护是靠选择______和______来保证选择性，定时限过电流保护是靠选择 ______来保证选择性。

2. 电流保护的接线方式可分为_______ 、 _______ 、 ________。

3. 过电流保护是指其作动电流按躲过______来整定，而时限按______来整定的一种电流保护。

4. 在相间故障的方向性电流保护中，方向元件采用______ 接线方式，B 相方向元件所接电流电压分别为______、 ______，在正方向故障时，其短路功率方向为从_____流向______。

5. 在复杂电网的后备保护之间，除要求各后备保护____相互配合外，还必须进行___的配合。

6. 零序功率的方向是由________，而正序功率的方向和它________。

7. 阶段式零序电流保护中无时限零序电流速断保护是靠选择________来保证选择性，带时限零序电流速断保护是靠选择________和________来保证选择性，定时限零序过电流保护是靠选择________来保证选择性。

8. 当系统发生________、________、________、________时出现零序电流分量。

9. 小电流接地系统单相接地时，接地相对地电压为_______，健全相对地电压为______ 。

10. 小电流单电源多线路系统单相接地时，将出现零序电压，在数值上为_______；非故障线路上零序电流实际方向为_____ ；在故障线路上零序电流实际方向为_______。

2.2 选择题

1. 电流继电器的返回系数______，过电压继电器的返回系数______，低电压继电器的返回系数______，无时限电流速断保护的灵敏系数______，限时电流速断保护的灵敏系数_______，定时限过电流保护的灵敏系数_______，三相完全星形接线方式的接线系数______，两相不完全星形接线方式的接线系数______。两相电流差接线方式，在三相短路时接线系数______，在 AC 两相短路时接线系数______，在 AB 或 BC 两相短路时接线系数______。

A. 大于 1　　B. 小于 1　　C . 等于 1　　D. 2　　E. $\sqrt{3}$

2. 阶段式电流保护只适用于______，方向性电流保护适用于______。

A . 单电源辐射网　　B. 双电源辐射网或单电源环网　　C . 任意结构电网

3. 阶段式电流保护中，______最灵敏，______最不灵敏。

A. 无时限电流速断保护　　B. 限时电流速断保护　　C . 定时限过电流保护

4. 当系统______、______、______、______、______不出现零序分量。

A. 单相接地短路　　B. 两相短路　　C . 三相短路　　D. 两相短路接地

E. 对称运行　　F. 对称振荡　　G. 对称过负荷　　H. 非全相运行

5. 电流速断保护的保护范围在_______运行方式下最小。

A. 最大　　B. 正常　　C. 最小

6. 双侧电源线路中的电流速断保护为提高灵敏性，方向元件应装在________。

A. 动作电流大的一侧　　B. 动作电流小的一侧　　C. 两侧

7. 定时限过电流保护的动作电流需要考虑返回系数，是为了________。

A. 提高保护的灵敏性　　B. 外部故障切除后可靠返回　　C. 解决选择性

8. 装有三段式电流保护的线路，当线路末端短路时，一般由______动作切除故障。

A. 瞬时电流速断保护　　B. 限时电流速断保护　　C. 定时限过电流保护

9. 双侧电源线路的过电流保护加装方向元件是为了________。

A. 解决选择性　　B. 提高灵敏性　　C. 提高可靠性

10. 若装有定时限过电流保护的线路，其末端变电所母线上有三条出线，各自的过电流保护动作时间分别为1.5s、0.5 s、1 s，则该线路过电流保护的动作时限应该整定为___s 。

A. 1.5　　B. 2　　C. 3.5

2.3 判断题

1. 零序电流保护能反应各种不对称故障，但不反应三相对称故障。　（　）

2. 三次谐波的电气量一定是零序分量。　（　）

3. 只要出现非全相运行状态，一定会出现负序电流和零序电流。　（　）

4. 过电流保护在系统运行方式变小时，保护范围也将变小。　（　）

5. 对正、负序电压而言，越靠近故障点其数值越小；而零序电压则是越靠近故障点数值越大。　（　）

6. 保护范围大的保护，灵敏性好。　（　）

7. 保护的跳闸回路中应串入断路器的常闭辅助接点。　（　）

8. 0.5s 的限时电流速度保护比 1s 的限时电流速度保护的灵敏性好。　（　）

9. 架空线路为了获取零序电容电流，通常采用零序电流互感器。　（　）

10. 瞬时电流速断保护的保护范围与故障类型有关。　（　）

2.4 问答题

1. 什么是起动电流、返回电流、返回系数？对电流继电器的返回系数有何要求？

2. 什么是电流速断保护、限时电流速断保护、定时限过电流保护？

3. 三段式电流保护的保护范围是如何确定的，在一条线路上，是否一定要用三段式保护？用两段行吗，为什么？

4. 什么是阶段式电流保护的时限特性？定时限过电流保护的动作时限在什么情况下间是否也有整定为0s？此时过电流保护是否可以称为“速断”，为什么？

5. 分析和评价阶段式电流保护中各段保护的异同，试按“四性”的要求评价它们的优缺点。

6. 定时限过电流保护在整定计算时为何要考虑自起动系数和返回系数？而电流速断保护在在整定计算时则不考虑自起动系数和返回系数？

7. 已知某一供电线路的最大负荷电流 $I_{L\cdot max}=100$ A，相间短路定时限过电流保护采

用两相不完全星形接线，电流互感器的变比 $K_{TA}=300/5$，当系统在最小运行方式时，线路末端的三相短路电流 $I_{k.min}=550\,A$，该线路定时限过电流保护作为近后备时，能否满足灵敏度的要求？（K_{ss}=1.2，K_{re}=0.85）

8．分析 Y/△-11 变压器△侧发生 AB 两相短路时两侧电流分布，说明其对 Y 侧两相不完全星形接线方式过电流保护的影响和解决措施。

9．在什么条件下，要求电流保护的动作具有方向性？

10．分析相间电流保护中正、反向故障时电压、电流的相位关系有何不同？

11．分析相间电流保护中正、反向故障时短路功率方向。

12．说明功率方向元件的作用及其所反应的量的实质是什么？

13． 何谓 90° 接线？保证采用 90° 接线的功率方向元件在正方向三相和两相短路时正确动作的条件是什么？为什么？采用 90° 接线的功率方向元件在相间短路时会不会有死区？为什么？

14．什么是按相起动原则？为什么要采用按相起动？

15．零序网络有什么特点？

16．说明在零序电流保护中，什么情况下必须考虑保护的方向性？

17．在大电流接地系统中，采用完全星形接线方式的相间电流保护也能反应所有接地故障，为何还要采用专用的零序电流保护？

18．中性点不接地系统中，单相接地时有何特点？

19．中性点经消弧线圈接地电网中，单相接地时有何特点，如何补偿方？

20．中性点经消弧线圈接地电网中，为什么不能采用完全补偿方式？

2.5 **计算题**

1. 如图 2.54 所示网络，已知保护 2、3、4、5 的最大动作时限，计算保护 1 电流 III 段的动作时限。

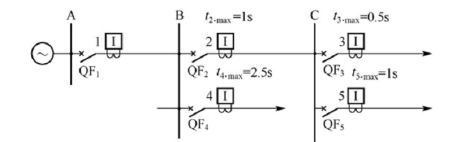


图 2.54 计算题 1 网络图

2. 如图 2.55 所示网络，已知 $Z_1=0.4\Omega/km$；$K_{rel}^{I}=1.25$；$K_{rel}^{II}=1.1$；$K_{rel}^{III}=1.2$；$K_{SS}=1.5$；$K_{re}=0.85$；$K_{TA}=300/5$。请对保护1进行三段式电流保护整定计算，若采用完全星形接线，计算继电器的动作电流。

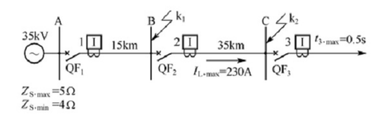


图 2.55　计算题 2 网络图

3. 如图 2.56 所示网络，流过保护 1、2、3 的最大负荷电流分别为 400A、500A、550A，$K_{SS}=1.3$，$K_{re}=0.85$，$K_{rel}^{III}=1.15$，$t_1^{III}=t_2^{III}=0.5s$，$t_3^{III}=1.0s$。计算：

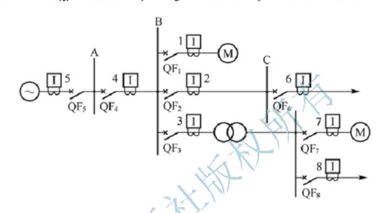


图 2.56 计算题 3 网络图

(1) 保护 4 的过电流整定值；

(2) 保护 4 的过电流整定值不变，保护 1 所在元件故障被切除，当返回系数 K_{re} 低于何值时会造成保护 4 的误动？

(3) $K_{re}=0.85$ 时，保护 4 的灵敏系数为 $K_{sen}=3.2$，当 $K_{re}=0.7$ 时，保护 4 的灵敏系数降低到多少？

4. 如图 2.57 所示网络中，已知：

(1) 电源等值电抗 $X_1=X_2=5\Omega$，$X_0=8\Omega$；

(2) 线路 AB、BC 的电抗 $x_1=0.4\Omega/km$，$x_0=1.4\Omega/km$；

(3) 变压器 T_1 的额定参数为 31.5MVA，110/6.6kV，$U_K=10.5\%$，其它参数如图所示。

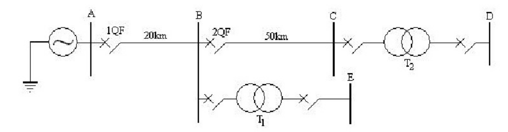
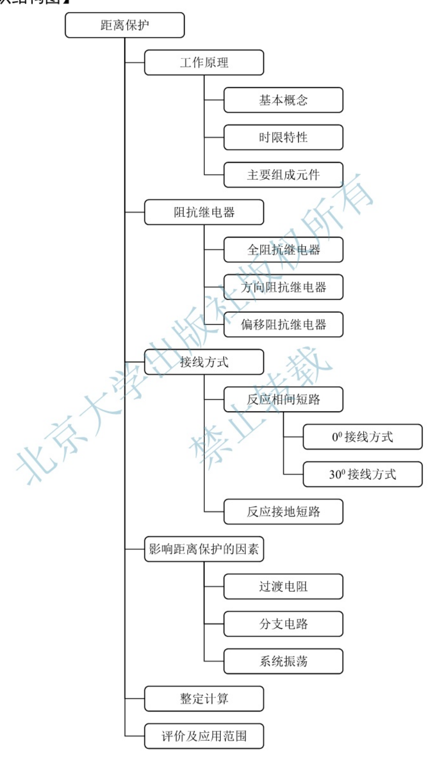


图 2.57　计算题 4 网络图

计算线路 AB 的零序电流保护的 I 段、II 段、III 段的动作电流、灵敏度和动作时限。

第 3 章　电网的距离保护

【本章知识结构图】



随着电力系统的进一步发展，出现了容量大、电压高、距离长、负荷重和结构复杂的网络，这时简单的电流、电压保护就难于满足电网对保护的要求。如何保证在结构复杂的高压电网中，保护装置能正确、可靠、迅速的动作，这些问题将在本章中予以解答。

【本章教学目标与要求】

掌握距离保护的工作原理；

掌握影响距离保护正确动作的因素；

熟悉阻抗继电器的动作特性；

熟悉距离保护的整定原则和方法；

了解振荡对距离保护影响的情况。



本章导图 1　1000kV 输电线路



本章导图 2 目前现场使用的微机继电保护屏

3.1 距离保护的基本原理与组成

3.1.1 距离保护的基本原理

距离保护是反应保护安装处至故障点的距离，并根据距离的远近而确定动作时限的一种保护装置。测量保护安装处至故障点的距离，实际上是测量保护安装处至故障点之间的阻抗大小，故有时又称阻抗保护。

测量阻抗通常用 Z_{m} 表示，它定义为保护安装处测量电压 $\dot{U}_{\mathrm{m}}$ 与测量电流 $\dot{I}_{\mathrm{m}}$ 之比，即

$$Z_{\mathrm{m}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m}}}{\dot{I}_{\mathrm{m}}} \tag{3-1}$$

式中 Z_{m} 为一复数，在复平面上既可以用极坐标形式表示，也可以用直角坐标形式表示，即

$$Z_{\mathrm{m}}=\left|Z_{\mathrm{m}}\right|\angle\varphi_{\mathrm{m}}=R_{\mathrm{m}}+jX_{\mathrm{m}} \tag{3-2}$$

式中$|Z_{\mathrm{m}}|$——测量阻抗的阻抗值；

φ_{m}——测量阻抗的阻抗角；

R_{m}——测量阻抗的实部，称测量电阻；

X_{m}——测量阻抗的虚部，称测量电抗。

电力系统正常运行时，$\dot{U}_{\mathrm{m}}$ 近似为额定电压，$\dot{I}_{\mathrm{m}}$ 为负荷电流，Z_{m} 为负荷阻抗。负荷阻抗的量值较大，其阻抗角为数值较小的功率因数角(一般功率因数不低于 0.9，对应的阻抗角不大于 25.8^{0})，阻抗性质以电阻性为主。

当线路故障时，母线测量电压为$\dot{U}_{\mathrm{m}}=\dot{U}_{\mathrm{k}}$，输电线路上测量电流为$\dot{I}_{\mathrm{m}}=\dot{I}_{\mathrm{k}}$，这时测量阻抗为保护安装处到短路点的短路阻抗 Z_{k}，即

$$Z_{\mathrm{m}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m}}}{\dot{I}_{\mathrm{m}}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{k}}}{\dot{I}_{\mathrm{k}}}=Z_{\mathrm{k}} \tag{3-3}$$

在短路以后，母线电压下降，而流经保护安装处的电流增大，这样短路阻抗 Z_{k} 比正常时测量到的阻抗 Z_{m} 大大降低，所以距离保护反应的信息量测量阻抗 Z_{m} 在故障前后变化比电流变化大，因而比反应单一物理量的电流保护灵敏度高。

距离保护的实质是用整定阻抗 Z_{set} 与被保护线路的测量阻抗 Z_{m} 比较。当短路点在保护范围以内时，即 $Z_{\mathrm{m}}<Z_{\mathrm{set}}$ 时，保护动作；当 $Z_{\mathrm{m}}>Z_{\mathrm{set}}$ 时，保护不动作。因此，距离保护又称低阻抗保护。

3.1.2 三相系统中测量电压和测量电流的选取

上面的讨论是以单相系统为基础的，在单相系统中，测量电压$\dot{U}_{\mathrm{m}}$就是保护安装处的电压，测量电流$\dot{I}_{\mathrm{m}}$就是被保护元件中流过的电流，系统金属性短路时两者间的关系为

$$\dot{U}_{\mathrm{m}}=\dot{I}_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{m}}=\dot{I}_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{k}}=\dot{I}_{\mathrm{m}}Z_1L_{\mathrm{k}} \tag{3-4}$$

式（3-4）是距离保护能够用测量阻抗来正确表示故障距离的前提和基础，即只有测量电压、测量电流之间满足该式，测量阻抗才能准确的反应故障的距离。

在实际三相系统中，可能发生多种不同的短路故障，而在各种不对称短路时，各相的电压、电流都不再简单地满足式（3-4），需要寻找满足式（3-4）的电压、电流接入保护装置，以构成在三相系统中可以用的距离保护。

现以图 3.1 所示网络中 k 点发生短路故障时的情况为例，对此问题予以分析。

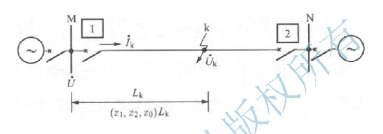


图 3.1 故障网络图

按照对称分量法，可以算出 M 母线上各相的电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\mathrm{A}}&=\dot{U}_{\mathrm{kA}}+\dot{I}_{\mathrm{A1}}Z_1L_{\mathrm{k}}+\dot{I}_{\mathrm{A2}}Z_2L_{\mathrm{k}}+\dot{I}_{\mathrm{A0}}Z_2L_{\mathrm{k}}\\&=\dot{U}_{\mathrm{kA}}+\left[(\dot{I}_{\mathrm{A1}}+\dot{I}_{\mathrm{A2}}+\dot{I}_{\mathrm{A0}})+3\dot{I}_{\mathrm{A0}}\frac{Z_0-Z_1}{3Z_1}\right]Z_1L_{\mathrm{k}}\\&=\dot{U}_{\mathrm{kA}}+(\dot{I}_{\mathrm{A}}+K\times3\dot{I}_0)Z_1L_{\mathrm{k}}\end{aligned} \tag{3-5a}$$

$$\dot{U}_B=\dot{U}_{kB}+(\dot{I}_{\mathrm{B}}+K\times3\dot{I}_0)Z_1L_{\mathrm{k}} \tag{3-5b}$$

$$\dot{U}_{\mathrm{C}}=\dot{U}_{\mathrm{kC}}+(\dot{I}_{\mathrm{C}}+K\times3\dot{I}_0)Z_1L_{\mathrm{k}} \tag{3-5c}$$

式中$\dot{U}_{\mathrm{kA}}$、$\dot{U}_{\mathrm{kB}}$、$\dot{U}_{\mathrm{kC}}$——故障点 k 处 A、B、C 的三相电压；

$\dot{I}_{\mathrm{A}}$、$\dot{I}_{\mathrm{B}}$、$\dot{I}_{\mathrm{C}}$——流过保护安装处的三相电流；

$\dot{I}_{\mathrm{A1}}$、$\dot{I}_{\mathrm{A2}}$、$\dot{I}_{\mathrm{A0}}$——流过保护安装处 A 相的正序、负序、零序电流；

Z_1、Z_2、Z_0——被保护线路单位长度的正序、负序、零序阻抗，一般情况下可按正、负序阻抗相等考虑；

K——零序电流补偿系数，$K=\dfrac{Z_0-Z_1}{3Z_1}$，可以是复数。

对于不同类型和相别的短路，故障点的边界条件是不同的，下面就几种故障情况予以分析。

1．单相接地短路故障（$k^{(1)}$）

以 A 相接地为例，当 A 相发生金属性短路时，$\dot{U}_{\text{kA}}=0$，式(3-5a)变为

$$\dot{U}_{\text{A}}=(\dot{I}_{\text{A}}+K\times 3\dot{I}_{0})Z_{1}L_{\text{k}} \tag{3-6}$$

若令$\dot{U}_{\text{mA}}=\dot{U}_{\text{A}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}=\dot{I}_{\text{A}}+K\times 3\dot{I}_{0}$，则式 3-6 变为

$$\dot{U}_{\text{mA}}=\dot{I}_{\text{mA}}Z_{1}L_{\text{k}} \tag{3-7}$$

与式 3-4 具有相同的形式，因而由$\dot{U}_{\text{mA}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}$算出的测量阻抗能够正确反应故障的距离，从而可以实现对故障区段的比较和判断。

对于非故障相 B、C，若令$\dot{U}_{\text{mB}}=\dot{U}_{\text{B}}$、$\dot{I}_{\text{mB}}=\dot{I}_{\text{B}}+K\times 3\dot{I}_{0}$或$\dot{U}_{\text{mC}}=\dot{U}_{\text{C}}$、$\dot{I}_{\text{mC}}=\dot{I}_{\text{C}}+K\times 3\dot{I}_{0}$，由于$\dot{U}_{\text{kB}}$、$\dot{U}_{\text{kB}}$不为零，式 3-5a 和式 3-5c 无法变成 3-4 的形式，所以两非故障相的测量电压、电流不能准确地反应故障的距离。又由于$\dot{U}_{\text{kB}}$、$\dot{U}_{\text{kC}}$均接近正常电压，而$\dot{I}_{\text{B}}$、$\dot{I}_{\text{C}}$均接近正常负荷电流，B、C 两相的工作状态与正常负荷状态相差不大，所有在 A 相故障时，由于 B、C 两相电压、电流算出的测量阻抗接近负荷阻抗，对应的距离一般都大于整定距离，由它们构成的距离保护一般都不会动作。

同理分析表明，在 B 相发生单相接地故障时，用$\dot{U}_{\text{mB}}=\dot{U}_{\text{B}}$、$\dot{I}_{\text{mB}}=\dot{I}_{\text{B}}+K\times 3\dot{I}_{0}$作为测量电压、电流能够正确反应故障距离，而用$\dot{U}_{\text{mA}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}$或$\dot{U}_{\text{mC}}$、$\dot{I}_{\text{mC}}$作为测量电压、电流计算出的距离一般都大于整定距离；C 相发生单相接地故障时，用$\dot{U}_{\text{mC}}=\dot{U}_{\text{C}}$、$\dot{I}_{\text{mC}}=\dot{I}_{\text{C}}+K\times 3\dot{I}_{0}$作为测量电压、电流能够正确反应故障距离，而用$\dot{U}_{\text{mA}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}$或$\dot{U}_{\text{mB}}$、$\dot{I}_{\text{mB}}$作为测量电压、电流计算出的距离一般都大于整定距离。

2．两相接地短路故障（$k^{(1,1)}$）

系统发生金属性两相接地故障时，故障点处两接地相的电压都为 0，以 B、C 两相接地故障为例，即$\dot{U}_{\text{kB}}=0$、$\dot{U}_{\text{kC}}=0$。令$\dot{U}_{\text{mB}}=\dot{U}_{\text{B}}$，$\dot{I}_{\text{mB}}=\dot{I}_{\text{B}}+K\times 3\dot{I}_{0}$或$\dot{U}_{\text{mC}}=\dot{U}_{\text{C}}$、$\dot{I}_{\text{mC}}=\dot{I}_{\text{C}}+K\times 3\dot{I}_{0}$,可以得到

$$\dot{U}_{\text{mB}}=\dot{I}_{\text{mB}}\times Z_{1}L_{\text{k}} \tag{3-8}$$

$$\dot{U}_{\text{mC}}=\dot{I}_{\text{mC}}\times Z_{1}L_{\text{k}} \tag{3-9}$$

两式均与式(3-4)形式相同，所以由$\dot{U}_{\text{mB}}$、$\dot{I}_{\text{mB}}$或$\dot{U}_{\text{mC}}$、$\dot{I}_{\text{mC}}$作出的测量和判断都能够正确的反应故障距离。

非故障相 A 相故障点处的电压$\dot{U}_{\text{kA}}\neq 0$，$\dot{U}_{\text{mA}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}$之间不存在式(3-4)所示的关系，且保护安装处的电压、电流均接近正常值，所以 B、C 两相接地故障时，用$\dot{U}_{\text{mA}}$、$\dot{I}_{\text{mA}}$算出的距离不能正确反应故

障的距离，且一般均大于整定距离。

将式(3-5a)和式(3-5c)相减，可得

$$\dot{U}_{B}-\dot{U}_{C}=(\dot{I}_{B}-\dot{I}_{C})Z_{1}L_{k} \tag{3-10}$$

令$\dot{U}_{mBC}=\dot{U}_{B}-\dot{U}_{C}$、$\dot{I}_{mBC}=\dot{I}_{B}-\dot{I}_{C}$，也可得到与式(3-4)相同的形式，因而用它们作为距离保护的测量电压和测量电流，同样能够正确反应故障距离。

由于在 B、C 两相接地故障的情况下，$\dot{U}_{mAB}=\dot{U}_{A}-\dot{U}_{B}$、$\dot{I}_{mAB}=\dot{I}_{A}-\dot{I}_{B}$以及$\dot{U}_{mCA}=\dot{U}_{C}-\dot{U}_{A}$、$\dot{I}_{mCA}=\dot{I}_{C}-\dot{I}_{A}$之间不存在式(3-4)所示的关系，所以由它们构成测量电压、电流都不能正确测量故障距离。由于在测量电压、电流中含有非故障相的电压、电流，且电压高，电流小，因此它们一般不会动作。

同理可知 A、B 两相或 C、A 两相接地故障时各故障相和非故障相元件的动作情况与 B、C 两相接地时相同。

3．两相不接地短路故障（$k^{(2)}$）

在金属性两相短路的情况下，故障点处两故障相的对地电压相等，各相电压都不为 0，现以 A、B 两相故障为例，因$\dot{U}_{kA}=\dot{U}_{kB}$，将式(3-5a)与式(3-5b)相减，可得

$$\dot{U}_{A}-\dot{U}_{B}=(\dot{I}_{A}-\dot{I}_{B})Z_{1}L_{k} \tag{3-11}$$

令$\dot{U}_{mAB}=\dot{U}_{A}-\dot{U}_{B}$、$\dot{I}_{mAB}=\dot{I}_{A}-\dot{I}_{B}$，可得到与 3-4 相同得形式。

非故障相 C 相故障点处的电压与故障相电压不等，作相减运算时不能被消掉，所以它不能用来进行故障距离的判断。

4．三相对称短路（$k^{(3)}$）

三相对称短路时，故障点处的各相电压相等，且三相系统对称时均为 0。这种情况下，选用任意一相的电压、电流或任意两相间的电压、电流差作为距离保护的测量电压和电流，都可得到与式 3-4 相同的形式，即能正确判断故障距离。

5．故障环路的概念及测量电压、电流的选取

经由以上对各种短路类型下正确测量故障距离的分析，可以寻找出接入距离保护中电压、电流间的规律。在系统中性点直接接地系统中，发生单相接地时，故障电流在故障相与大地之间流通；两相接地短路时，故障电流既可在两故障相与大地间流通，也可在两故障相间流通；两相不接地短路时，故障电流在两故障相间流通；而三相短路时，故障电流可在任何两相间流通。

如果把故障电流可以流通的通路称为故障环路，则在单相接地短路时，存在一个故障相与大地之间的故障环路（相-地故障环）；两相接地短路时，存在两个故障相与大地间的（相-地）故障环路和一个两故障相间的（相-相）故障环路；三相短路接地时，存在三个相-地故障环和三个相-相故障环路。

上述分析表明，故障环路上的电压和环路中流通的电流之间满足式(3-4）,用它们作为测量电压和测量电流所算出的测量阻抗，能够正确反应保护安装处到故障点的距离。而非故障环路上的电压、电流之间不满足式（3-4），由它们算出的测量阻抗就不能正确反应故障距离。

距离保护应取故障环路上的电压、电流作为判断故障距离的依据，而用非故障环路上的电压、电流计算得到的距离一般大于保护安装处到故障点的距离。

对于接地短路，取相-地故障环路，测量电压为保护安装处故障相对地电压，测量电流为带有零序

电流补偿的故障相电流，由它们算出的测量阻抗能够准确反应单相接地故障、两相接地故障和三相接地故障下的故障距离，这种合理选取相地环路中电流、电压的方法称为接地距离保护接线方式。

对于相间短路，故障环路为相-相故障环路，取测量电压为保护安装处两故障相的电压差，测量电流为两故障相的电流差，由它们算出的测量阻抗能够准确反应两相短路、三相短路和两相接地短路情况下的故障距离，这种合理选取相相环路中电流、电压的方法称称为相间距离保护接线方式。

两种接线方式的距离保护在各种不同类型短路时的动作情况如表 3-1 所示。

表 3-1　　接地距离保护和相间距离保护在不同类型短路时的动作情况

接线方式 / 故障类型		接地距离保护方式			相间距离保护方式		
		A 相	B 相	C 相	AB 相	BC 相	CA 相
		$\dot U_{mA}=\dot U_A$ $\dot I_{mA}=\dot I_A+K\times 3\dot I_0$	$\dot U_{mB}=\dot U_B$ $\dot I_{mB}=\dot I_B+K\times 3\dot I_0$	$\dot U_{mC}=\dot U_C$ $\dot I_{mC}=\dot I_C+K\times 3\dot I_0$	$\dot U_{mAB}=\dot U_A-\dot U_B$ $\dot I_{mAB}=\dot I_A-\dot I_B$	$\dot U_{mBC}=\dot U_B-\dot U_C$ $\dot I_{mBC}=\dot I_B-\dot I_C$	$\dot U_{mCA}=\dot U_C-\dot U_A$ $\dot I_{mCA}=\dot I_C-\dot I_A$
单相接地短路	A	+	-	-	-	-	-
	B	-	+	-	-	-	-
	C	-	-	+	-	-	-
两相接地短路	AB	+	+	-	+	-	-
	BC	-	+	+	-	+	-
	CA	+	-	+	-	-	+
两相不接地短路	AB	-	-	-	+	-	-
	BC	-	-	-	-	+	-
	CA	-	-	-	-	-	+
三相短路	ABC	+	+	+	+	+	+

注：“＋”表示能正确反应故障距离；“-”表示不能正确反应故障距离。

3.1.3 距离保护的时限特性

距离保护是利用测量阻抗来反应保护安装处至短路点之间的距离，当两个故障点分别发生在线路的末端或下一级线路始端时，保护同样存在无法区分故障点选择性的问题，为了保证选择性，目前获得广泛应用的是阶梯形时限特性，这种时限特性与三段式电流保护的时限特性相同，一般也做成三阶梯式，即有与三个动作范围相对应的三个动作时限，如图 3.2 所示。

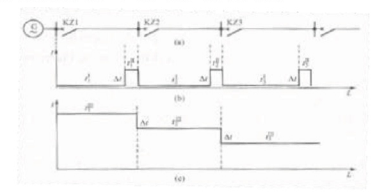


图 3.2 距离保护时限特性图

(a) 网络图；　(b) Ⅰ Ⅱ段时限特性图；　(c) Ⅲ段时限特性图

距离Ⅰ段为无延时的速动段，其动作时限 t_1^{I} 仅为保护装置的固有动作时间。为了与下一条线路保护的Ⅰ段有选择性的配合，则两者保护范围不能重迭，因此，Ⅰ段的保护范围不能延伸到下一线路中去，

而为本线路全长的 80～85%，即 I 段的动作阻抗整定为 80～85%线路全长的阻抗。

距离 II 段为带延时的速动段，其时限为t_2^{II}。为了有选择性地动作，距离 II 段的动作时限和起动值要与相邻下一条线路保护的 I 段和 II 段相配合。根据相邻线路之间选择性配合的原则：两者的保护范围重迭，则两保护的动作时限整定不同；若动作时限相同，则保护范围不能重迭；因此，与下一线路距离保护 I 段的配合，采取整定时限t_2^{II}大于下一线路保护 I 段时间t_1^{I}一个Δt的措施，通常第 II 段的整定时限取 0.5s；与下一线路保护的第 II 段之间的配合，因两者时限相同，则保护范围不能重迭，故距离保护 II 段的保护范围不应超过下一线路距离 I 段的保护范围，即第 II 段的动作阻抗整定为小于下一条线路第 I 段保护范围末端短路时的测量阻抗。

距离III段为本线路和相邻线路（元件）的后备保护，其动作时限t_3^{III}的整定原则与过电流保护相同，即大于下一条变电站母线出线保护的最大动作时限一个Δt，其动作阻抗应按躲过正常运行时的最小负荷阻抗来整定。

3.1.4 距离保护的组成

距离保护装置一般由以下 5 个主要元件组成。

1．起动元件

当被保护线路发生故障时，瞬间起动保护装置，以判断线路是否发生了故障，并兼有后备保护的作用。通常起动元件采用过电流继电器或阻抗继电器。为了提高元件的灵敏度，也可采用反应负序电流或零序电流分量的复合滤过器来作为起动元件。

2．测量元件

用来测量保护安装处至故障点之间的距离，并判别短路故障的方向。通常采用带方向性的阻抗继电器作测量元件。如果阻抗继电器是不带方向性的，则需增加功率方向元件来判别故障的方向。

3．时间元件

用来提供距离保护 II 段、III段的动作时限，以获得其所需要的动作时限特性。通常采用时间继电器或延时电路作为时间元件。

4．振荡闭锁元件

用来防止当电力系统发生振荡时，距离保护的误动作。在正常运行或系统发生振荡时，振荡闭锁元件将保护闭锁，而当系统发生短路时，解除闭锁开放保护，使保护装置根据故障点的远、近有选择性的动作。

5．电压回路断线失压闭锁元件

用来防止电压互感器二次回路断线失压时，引起阻抗继电器的误动作。

3.2　阻抗继电器及其动作特性

阻抗继电器是距离保护装置的核心元件，它主要用来作测量元件，也可以作起动元件兼作功率方向元件。

阻抗继电器种类繁多。按其构成方式不同分为电磁型、整流型、晶体管型；按其构成原理不同可分为幅值比较、相位比较和多输入量时序比较；按其动作特性不同可分为圆阻抗特性、直线特性、四边形阻抗特性、苹果形阻抗特性等；按阻抗继电器的接线方式不同可分为单相式、多相式、滤序式、多相补偿式等。

3.2.1 用复数阻抗平面分析阻抗继电器的特性

按相测量阻抗的继电器称为单相式阻抗继电器，加入继电器中的量只有一个电压和一个电流。由于电压与电流之比是阻抗，所以测量阻抗可以通过测量电压和电流来实现。继电器动作情况取决于 Z_m 的值，当测量阻抗 Z_m 小于预定的整定值 Z_{set} 时动作，大于整定值时不动作。因测量阻抗 Z_m 可以写成

R+jX 这种复数形式，故可以在复数阻抗平面上用作图法表示出来，如图 3.3 所示。图中相量 Z_m 的模值为 $\sqrt{R_m^2+X_m^2}$ ，幅角为 $\tan^{-1}\dfrac{X_m}{R_m}$ 。

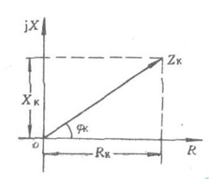


图 3.3　阻抗相量在复平面上的表示

对于输电线路，同样可以在复数阻抗平面上用相量 Z 表示其阻抗。例如图 3.4 所示的系统，如果各段线路的阻抗角相同，则该线路在复数阻抗平面上的形状是一条直线。并超前 R 轴 φ_m 角，将线路 BC 的 B 端（保护 B 的安装处）置于坐标原点，保护 B 正方向的线路阻抗画在第Ⅰ象限，并超前 R 轴 φ_m 角，用相量 Z_{BC} 表示；保护 B 反方向的线路 AB 的阻抗画在第Ⅲ象限，用 Z_{AB} 表示，如图 3.5 所示。

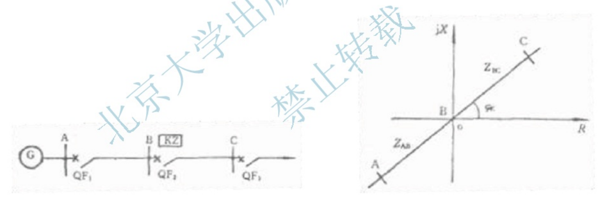


图 3.4　系统图　　图 3.5 任意网络阻抗在复平面上的表示

对于单相阻抗继电器的动作范围，原则上在阻抗复数平面上用一个小方框就可以满足要求，如图 3.6 所示。但是当短路点有过渡电阻存在时，阻抗继电器的测量阻抗将不在幅角为 φ_m 的直线上。此外，电压互感器，电流互感器都存在角误差，这样也将使测量阻抗角发生变化。所以，要求阻抗继电器的动作范围不是以 φ_m 为幅角的直线，应将其动作范围扩大，扩大为一个面或圆（但整定值不变）。目前已经实现的有圆特性，椭圆特性，橄榄特性，苹果特性，直线特性，四边形特性等。在以上各种特性的继电器中，以圆特性和直线特性的继电器最为简单，应用也最为普遍。

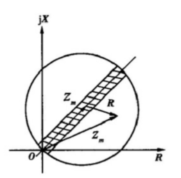


图 3.6 过渡电阻对测量阻抗的影响

应该指出，对于多相补偿式阻抗继电器，由于加入继电器的不是单一的电压和电流，因此，就不能用测量阻抗的概念在阻抗复平面上分析它的特性，而只能用数学式来表达。

3.2.2 比幅原理和比相原理

在线性器件中，两个正弦交流电气量之间的关系包括幅值大小和相位关系。因此，可以利用比较其幅值大小和相位关系来构成继电器，其中反映两电气量幅值大小关系的继电器称为幅值比较继电器，简称比幅器；反映相位关系的继电器为相位比较继电器，简称比相器。现对比幅原理、比相原理及其互换关系进行分析。

1．比幅原理

任何按比幅原理工作的阻抗继电器都具有两个输入量，其中一个构成动作量，另一个构成制动量。比较两个电气量的幅值，就是只比较其幅值大小，而不管它们的相位如何。例如，有两个正弦交流电气量 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$，其数学表达式为

$$\dot{A} = Ae^{j\varphi_a} \tag{3-12a}$$

$$\dot{B} = Be^{j\varphi_b} \tag{3-12b}$$

相量 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$ 的幅值分别用 $|\dot{A}|$ 和 $|\dot{B}|$ 表示。比幅器的动作边界条件为

$$|\dot{A}| = |\dot{B}| \tag{3-13}$$

当 $|\dot{A}| > |\dot{B}|$ 时，继电器动作；当 $|\dot{A}| < |\dot{B}|$ 时，继电器不动作。

按比幅原理工作的继电器基本方框图如图 3.7 所示。

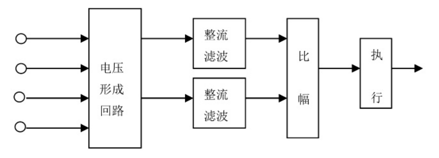


图 3.7 比幅式继电器的实现方框图

在图 3.7 中，输入继电器的电压 $\dot{U}_m$ 和电流 $\dot{I}_m$，通过电压形成回路，按继电器的某种特性方程关系，形成 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$ 两个被比较的交流电气量，然后分别整流、滤波，取幅值 $|\dot{A}|$ 和 $|\dot{B}|$ 后，将其输入比幅电路。比幅电路有均压法和环流法两种，但一般都采用环流法接线。比幅电路根据比较的结果，输出直流电

压信号作用于执行元件。

2. 比相原理

比相器的动作决定于被比较两电气量的相位，而与它们的幅值大小无关。用 $\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ 表示这两个正弦交流电气量，其数学表达式为

$$\dot{C} = Ce^{j\varphi_c} \tag{3-14a}$$

$$\dot{D} = De^{j\varphi_d} \tag{3-14b}$$

按比相原理构成的继电器动作条件一般可写为

$$-\varphi_1 \leq \arg\frac{\dot{C}}{\dot{D}} \leq \varphi_2 \tag{3-15}$$

式中符号 $\arg\frac{\dot{C}}{\dot{D}}$ 表示取复数 $\frac{\dot{C}}{\dot{D}}$ 的相角，当相量 $\dot{C}$ 超前 $\dot{D}$ 时，相角 $\arg\frac{\dot{C}}{\dot{D}}$ 为正，反之为负。

动作范围为-90^0~90^0 的继电器称为余弦型比相器，其动作特性如图 3.8 所示。

按比相原理工作的继电器，其方框图如图 3.8 所示。

在图 3.9 中，反应被保护元件工作情况的电压 $\dot{U}_m$ 及电流 $\dot{I}_m$，通过电压形成回路，按继电器的某种特定关系，转换成相位比较的两个电气量 $\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ ，送入比相电路进行比较，根据两电气相量

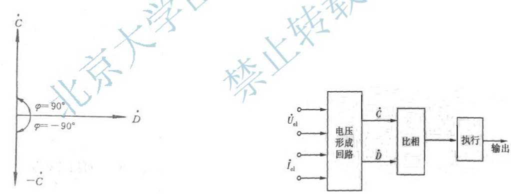


图 3.8 余弦型比相器的动作范围　　图 3.9 比相式继电器的实现方框图

相位比较结果，输出一直流电压信号作用于执行元件。

3. 比幅与比相之间的转换关系

上述分析说明，比幅和比相虽然是两种不同的原理和方法，但可以构成同一特性的继电器。它们之间存在着一定的内在关系，在一定条件下可以互换，把输入量作适当的组合就可以利用比幅式实现相位比较。反之，也可利用比相式实现幅值比较。

按比幅原理工作的继电器，以 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$ 示比幅的两个电气量，而且继电器动作条件为 $|\dot{A}| \geqslant |\dot{B}|$，按比相原理工作的继电器，以 $\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ 表示比相的两个电气量，它的动作条件为

$$-90^0 \leqslant \arg\frac{\dot{C}}{\dot{D}} \leqslant 90^0$$

这两类继电器的动作条件，恰好可以用在复数平面上平行四边形的两条边与对角线的关系来表示，如图 3.10 所示。$\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ 为两条边，则两条对角线为 $\dot{A}$ 和 $\dot{B}$ 。

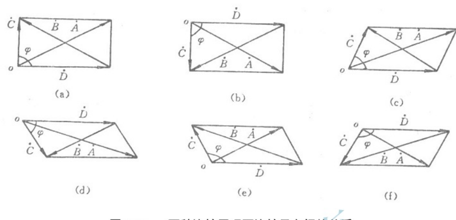


图 3.10　两种比较原理两比较量之间的关系

（a）$\varphi=90^0$　（b）$\varphi=-90^0$　（c）$\varphi<90^0$

（d）$\varphi>-90^0$　（e）$\varphi>90^0$　（f）$\varphi<-90^0$

由图 3.10 可以看出，不管 $\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ 的大小如何，若 φ 为 90^0 或 -90^0 时，相位比较正好处于临界状态，这时图形为一矩形，两对角线长短相等，即 $|\dot{A}|=|\dot{B}|$，如图 3.10（a）、(b)所示；当 $-90^0<\varphi<90^0$ 时，相位比较处于动作状态，由图 3.10（c）、（d）可知，$|\dot{A}|>|\dot{B}|$，幅值比较也处于动作状态；当 $\varphi>90^0$ 或 $\varphi<-90^0$ 时，$|\dot{A}|<|\dot{B}|$，两类继电器都不在动作区内，如图 3.10（e）、（f）所示。

由此得出两种比较原理的两组比较量的互换关系如下

$$\left.\begin{aligned}\dot{A}=\dot{C}+\dot{D}\\ \dot{B}=\dot{C}-\dot{D}\end{aligned}\right\} \tag{3-16}$$

同样可得

$$\left.\begin{aligned}\dot{C}=\frac{1}{2}(\dot{A}+\dot{B})\\ \dot{D}=\frac{1}{2}(\dot{A}-\dot{B})\end{aligned}\right\} \tag{3-17}$$

由于是比较相位，式（3-6）中的常数 $\frac{1}{2}$ 不影响 $\dot{C}$ 和 $\dot{D}$ 的比较结果，故可把式(3-17)变为

$$\left.\begin{aligned}\dot{C}=\dot{A}+\dot{B}\\ \dot{D}=\dot{A}-\dot{B}\end{aligned}\right\} \tag{3-18}$$

上述关系说明，动作条件 $-90^0\leqslant\varphi\leqslant90^0$ 的相位比较与动作条件为 $|\dot{A}|\geqslant|\dot{B}|$ 的幅值比较等效，利用式（3-17）或式（3-18），即可由一种比较原理的比较量算出另一种比较原理的比较量，他们所构成的

动作特性完全相同。但是应该指出，在应用幅值比较与相位比较转换关系式时应注意其条件：当幅值比较继电器动作条件为$|\dot{A}| \geqslant |\dot{B}|$时，则相位比较继电器的动作角度范围为$\varphi$＝-$90^0$～$90^0$；如果相位比较继电器的动作边界不是$\pm 90^0$，则不能应用上述的转换关系。此外，这种转换关系只能适用于正弦波的交流电气量。

3.2.3 阻抗继电器的动作特性和动作方程

阻抗继电器动作区域的形状称为动作特性。例如动作区域为圆时称为圆特性；动作区域为四边形时称为四边形特性。动作特性既可以用阻抗复平面上的几何图形来描述，也可用复数的数学方程来描述，这种方程称为动作方程。下面对几种不同特性的阻抗继电器予以分析。

1. 圆特性阻抗继电器

根据动作特性圆在阻抗复平面上位置和大小的不同，圆特性又分为偏移圆特性、方向圆特性和全阻抗圆特性等。

1） 偏移圆特性

偏移圆特性的动作区域如图 3.11 所示，它有两个整定阻抗，即正方向整定阻抗 Z_{set1} 和反方向整定阻抗 Z_{set2}，两整定阻抗对应矢量末端的连线就是圆的直径。特性圆包含坐标原点，圆心位于$\frac{1}{2}(Z_{set1}+Z_{set2})$处，半径为$\left|\frac{1}{2}(Z_{set1}+Z_{set2})\right|$。圆内为动作区，圆外为非动作区。当测量阻抗正好落在圆周上时，阻抗继电器临界动作。

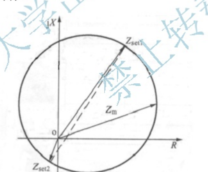


图 3.11 偏移圆特性

对应于该特性的动作方程，可以有两种不同的表达式：一种是比较两个量大小的幅值比较原理表达式；另一种是比较两个量相位的比较原理表达式。

（1） 幅值比较原理

当测量阻抗 Z_m 落在圆内或圆周上时，Z_m 末端到圆心的距离一定小于或等于圆的半径；而当测量阻抗 Z_m 落在圆外时，Z_m 末端到圆心的距离一定大于圆的半径。所以动作条件可表示为

$$\left|Z_m-\frac{1}{2}(Z_{set1}+Z_{set2})\right| \leq \left|\frac{1}{2}(Z_{set1}-Z_{set2})\right| \tag{3-19}$$

式中 Z_{set1}、Z_{set2} 均为已知的整定阻抗，Z_m 可由测量电压$\dot{U}_m$和测量电流$\dot{I}_m$算出。

当 Z_m 满足上式时，阻抗继电器动作，否则不动作。式（3-19）就是偏移圆特性阻抗继电器的幅值

比较动作方程。

（2）相位比较原理

如上所述，Z_{set1} 与 Z_{set2} 矢量末端的连线，就是圆特性的直径，他将圆分成两部分，即右下部分和左上部分，如图 3.12 所示。由图可见，当测量阻抗落在右下部分圆周的任一点上时，有

$$\arg\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}=90^0 \tag{3-20}$$

当测量阻抗落在左上部分圆周的任一点上时，有

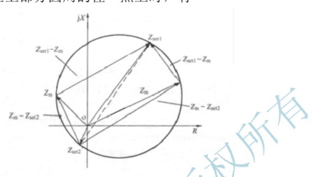


图 3. 12 用相位比较法实现的偏移特性圆

$$\arg\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}=-90^0 \tag{3-21}$$

当测量阻抗落在圆内任一点时，有

$$-90^0<\mathrm{rg}\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}<90^0 \tag{3-22}$$

当测量阻抗落在圆外点时，有

$$\arg\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}>90^0 \text{ 或 } \mathrm{rg}\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}< -90^0 \tag{3-23}$$

因而测量元件的动作条件可表示为

$$90^0\le\arg\frac{Z_{set1}-Z_m}{Z_m-Z_{set2}}\le 90^0 \tag{3-24}$$

式（3-24）就是偏移圆特性阻抗继电器的相位比较动作方程。

使阻抗元件处于临界动作状态对应的阻抗称为动作阻抗，通常用 Z_{op} 表示。对于具有偏移圆特性的阻抗继电器而言，当测量阻抗 Z_m 的阻抗角不同时，对应的动作阻抗是不同的。当测量阻抗 Z_m 的阻抗角与正向整定阻抗 Z_{set1} 的阻抗角相等时，阻抗继电器的动作阻抗最大，正好等于 Z_{set1}，即 $Z_{op}=Z_{set1}$，此时继电器最灵敏，所以 Z_{set1} 的阻抗角又称为最大灵敏角。

最大灵敏角是阻抗继电器的一个重要参数，一般取为被保护线路的阻抗角。当测量阻抗 Z_m 的阻抗

角与反向整定阻抗 Z_{set2} 的阻抗角相等时，动作阻抗最小，正好等于 Z_{set2}，即 $Z_{op}=Z_{set2}$。

由上述分析可见，偏移圆特性的阻抗继电器在反向故障时有一定的动作区。如果 Z_{set2} 的方向正好与 Z_{set1} 的方向相反，则 Z_{set2} 可以用 $-\rho Z_{set1}$ 表示，ρ 称为偏移特性的偏移率。偏移特性的阻抗元件通常用在距离保护的后备段（如第Ⅲ段）中。

2）方向圆特性

在上述的偏移圆特性中，如果令 $Z_{set2}=0$，$Z_{set1}=Z_{set}$，则动作特性就变成方向圆特性，动作区域如图 3.13 所示。特性圆经过坐标原点，圆心位于 $\frac{1}{2}Z_{set}$ 处，半径为 $\left|\frac{1}{2}Z_{set}\right|$。

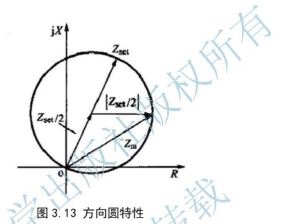


图 3.13 方向圆特性

将 $Z_{set2}=0$，$Z_{set1}=Z_{set}$ 代入式（3-19），可得到方向圆特性的幅值比较动作方程为

$$\left|Z_m-\frac{1}{2}Z_{set}\right|\le\left|\frac{1}{2}Z_{set}\right| \tag{3-25}$$

将 $Z_{set2}=0$，$Z_{set1}=Z_{set}$ 代入式（3-24），可得到方向圆特性的相位比较动作方程为

$$-90^0\le\arg\frac{Z_{set}-Z_m}{Z_m}\le 90^0 \tag{3-26}$$

与偏移阻抗圆特性类似，方向圆特性对于不同的 Z_m 阻抗角，动作阻抗也是不同的。在整定阻抗的方向上，动作阻抗最大，正好等于整定阻抗；其他方向的动作阻抗都小于整定阻抗；在整定阻抗的反方向，动作阻抗为 0。反向故障时不会动作，阻抗元件本身具有方向性。

从原理上讲，不管继电器在阻抗复平面上是何种动作特性，只要能判断出短路阻抗的大小和短路方向，都可称之为方向阻抗继电器。但是，习惯上是指在阻抗复平面上过坐标原点并具有圆形特性的阻抗继电器。

方向圆特性的阻抗元件一般用于距离保护的主保护段（Ⅰ段和Ⅱ段）中。

方向圆特性的动作阻抗圆经过坐标原点，根据复数反演的理论，当把该特性反演到导纳平面（即取 $Y_m=\frac{1}{Z_m}$，做 Y_m 的动作特性）时，导纳动作特性为一直线。因而也有将方向圆特性的阻抗继电器称为

导纳继电器或欧姆继电器。

3）全阻抗圆特性

在偏移特性中，如果令 $Z_{set2}=-Z_{set}$，$Z_{set1}=Z_{set}$，则动作特性就变为圆特性，动作区域如图 3.14 所示。特性圆的圆心位于坐标圆点处，半径为 $|Z_{set}|$。

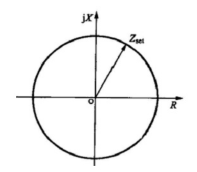


图 3.14 全阻抗圆特性

将 $Z_{set2}=-Z_{set}$，$Z_{set1}=Z_{set}$ 代入（3-19），可以得到全阻抗圆特性的幅值比较动作方程为

$$|Z_m|\le|Z_{set}| \tag{3-27}$$

将 $Z_{set2}=-Z_{set}$，$Z_{set1}=Z_{set}$ 代入式（3-24），可得到全阻抗圆特性的相位比较动作方程为

$$-90^0\le\arg\frac{Z_{set}-Z_m}{Z_{set}+Z_m}\le 90^0 \tag{3-28}$$

全阻抗圆特性在各个方向上的动作阻抗都相同，它在正向或反向故障的情况下具有相同的保护区，即阻抗元件本身不具有方向性。全阻抗圆特性的阻抗元件可以应用于单侧电源的系统中；当应用于多侧电源时，应与方向元件相配合。

2. 直线特性的阻抗元件

直线特性的阻抗元件可以看作是圆特性阻抗元件的特例，当上述特性圆的圆心在无穷远处，而直径趋向于无穷大时，圆形动作边界就变为直线边界。因而，圆特性中的幅值比较原理和相位比较原理都可以应用于直线特性。

根据直线在阻抗复平面上位置和方向的不同，直线特性可分为电抗特性、电阻特性和方向特性等几种。

1） 电抗特性

电抗特性的动作边界如图 3.15 中的直线 1 所示。动作边界直线平行于 R 轴，到 R 轴的距离为 X_{set}，直线的下方为动作区。

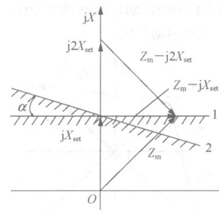


图 3.15 电抗特性

由图 3.15 可知，当测量阻抗 $Z_{\rm m}$ 落在动作特性直线上（即处于临界动作状态）时，

$\left|Z_{\rm m}-j2X_{\rm set}\right|=\left|Z_{\rm m}\right|$、$\arg\dfrac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}=-90^0$（虚轴左侧）或 $\arg\dfrac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}=90^0$（虚轴右侧）；落在

动作特性直线下方（即动作区中）时，$\left|Z_{\rm m}-j2X_{\rm set}\right|>\left|Z_{\rm m}\right|$、$-90^0<{\rm rg}\dfrac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}<90^0$；

落在动作特性直线上方（即非动作区中）时，$\left|Z_{\rm m}-j2X_{\rm set}\right|<\left|Z_{\rm m}\right|$、$90^0<\arg\dfrac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}<270^0$。

所以电抗特性的幅值比较动作方程和相位比较动作方程分别为

$$\left|Z_{\rm m}\right|\le\left|Z_{\rm m}-j2X_{\rm set}\right| \tag{3-29}$$

$$-90^0<{\rm rg}\frac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}<90^0 \tag{3-30}$$

电抗特性的动作情况只与测量阻抗中的电抗分量有关，与电阻无关，因而它有很强的耐过渡电阻的能力。但它本身不具有方向性，且在负荷阻抗情况下也可能动作，所以它通常不能独立应用，而是与其他特性复合，形成具有复合特性的阻抗元件。

实际应用的电抗特性一般为图 3.15 中的直线 2，相应的特性称为准电抗特性或正电抗特性，它与直线 1 的夹角为α，对应的相位比较动作方程为

$$-90^0-\alpha\le\arg\frac{Z_{\rm m}-jX_{\rm set}}{-jX_{\rm set}}\le 90^0-\alpha \tag{3-31}$$

2） 电阻特性

动作特性的动作边界如图 3.16 所示。动作边界直线平行于 jX 轴，到 jX 轴的距离为 $R_{\rm set}$,直线的左侧为动作区。

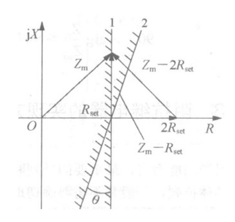


图 3.16 电阻特性

类似于电抗特性的分析，可以得到电阻特性阻抗形式的幅值比较动作方程和相位比较动作方程分别为

$$\left|Z_{\mathrm{m}}\right| \le \left|Z_{\mathrm{m}} - 2R_{\mathrm{set}}\right| \tag{3-32}$$

$$-90^{0} \le \arg\frac{Z_{\mathrm{m}} - R_{\mathrm{set}}}{-R_{\mathrm{set}}} \le 90^{0} \tag{3-33}$$

与电抗特性一样，电阻特性通常也是与其他特性复合，形成具有复合特性的阻抗元件。实际应用的电阻特性一般为图 3.16 中的直线 2，相应的特性称为准电阻特性或修正电阻特性，它与直线 1 的夹角为 θ，对应的相位比较动作方程为

$$-90^{0} - \theta \le \arg\frac{Z_{\mathrm{m}} - R_{\mathrm{set}}}{-R_{\mathrm{set}}} \le 90^{0} - \theta \tag{3-34}$$

3） 方向特性

方向特性的动作边界如图 3.17 所示。动作边界直线经过坐标原点，且与整定阻抗 Z_{set} 方向垂直，直线的右上方（即 Z_{set} 一侧）为动作区。

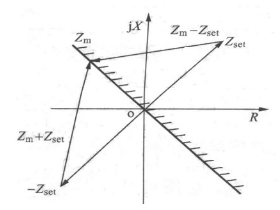


图 3.17 方向特性

类似于电抗特性的分析，可以得到方向特性阻抗形式的幅值比较动作方程和相位比较动作方程分别为

$$\left|Z_{\mathrm{m}} - Z_{\mathrm{set}}\right| \le \left|Z_{\mathrm{m}} + Z_{\mathrm{set}}\right| \tag{3-35}$$

$$-90^0 \le \arg\frac{Z_m}{Z_{set}} \le 90^0 \tag{3-36}$$

3.3　阻抗继电器的实现方法

对于动作于跳闸的继电保护功能而言，最重要的是判断出故障处于规定的保护区内还是区外，至于区内或区外的具体位置，一般并不需要确切地知道。这样，就可以用两种不同的方法来实现距离保护。一种是首先精确地测量出 Z_m，然后再将它与事先确定的动作特性进行比较。当 Z_m 落在动作区域之内时，判为区内故障，给出动作信号；当 Z_m 落在动作区域之外时，继电器不动作。另一种方法无需精确的测出 Z_m，只需间接地判断它是处在动作边界之内还是处在动作边界之外，即可确定继电器动作或不动作。

阻抗继电器一般根据已经推导出的幅值比较动作方程和相位比较动作方程来实现，也可以按照距离保护原理的要求由其他方法实现。

3.3.1 幅值比较原理的实现

令 $\dot{A}=Z_A$、$\dot{B}=Z_B$，根据幅值比较的条件并在该式两端同乘以测量电流 $\dot{I}_m$，并令 $\dot{I}_m Z_A = \dot{U}_A$，$\dot{I}_m Z_B = \dot{U}_B$，则幅值比较的动作条件又可以表示为

$$\left|\dot{U}_B\right| \le \left|\dot{U}_A\right| \tag{3-37}$$

式（3-37）称为电压形式的幅值比较方程。

1．模拟式距离保护中幅值比较的实现

在传统的模拟式距离保护中，幅值比较原理是以电压比较的形式实现的。根据动作特性的需要，首先形成两个参与比较的电压量 $\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$，然后在幅值比较电路中比较两者的大小，满足式（3-37）时，发出动作信号。

早期的整流型或晶体管型模拟式保护装置中，电压形成是依靠回路串、并联连接的方法实现的。以圆特性的方向阻抗元件为例，可用图 3.18 所示的回路连接完成电压形成。

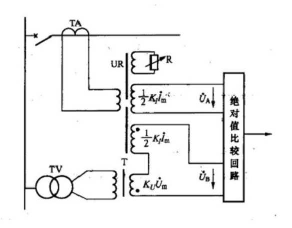


图 3.18 幅值比较的电压形成电路

在图中，T 为电压变换器，它将电压互感器的输出电压变换为适合弱电回路运算的电压，有一个输

入绕组和一个输出绕组，输出电压接入阻抗继电器的电压形成回路。变换器的变换系数 K_U 为没有量纲的实数，所以变换器的输出电压与输入电压同相位，幅值为 $\left|K_U \dot{U}_m\right|$。

UR 为电抗互感器，它有一个输入绕组和三个输出绕组，输入来自电流互感器的二次电流，三个输出绕组中，其中一个绕组接调节电阻，另外两个绕组接阻抗继电器的电压形成回路。接电压形成回路的两个绕组的输出电压都为 $\frac{1}{2}K_I\dot{I}_m$，其中 K_I 为具有阻抗量纲的复数变换系数，改变匝数可以改变变换系数的值，改变调节绕组中的调节电阻，可以改变其阻抗角。电抗互感器的铁芯有气隙，其输出电压近似为输入电流的导数，对输入电流中不同频率成分的影响是不同的，对于输入信号中的直流分量，其输出基本没有反映，即可以滤除直流分量，而当输入中含有高频信号时，它将会有较大的放大作用。

按照图 3.18 所示的回路，可以得到

$$\dot{U}_A = \frac{1}{2}K_I\dot{U}_m \tag{3-38}$$

$$\dot{U}_B = \frac{1}{2}K_I\dot{I}_m - K_U\dot{U}_m \tag{3-39}$$

幅值比较回路的动作条件为

$$\left|\frac{1}{2}K_I\dot{I}_m - K_U\dot{U}_m\right| \le \left|\frac{1}{2}K_I\dot{I}_m\right| \tag{3-40}$$

两侧同除以 $\left|K_U\dot{I}_m\right|$，并令 $\frac{K_I}{K_U} = Z_{set}$，式（3-40）就变成了式（3-25）的形式，即为用阻抗表示的具有方向圆特性的阻抗继电器。

在集成电路型的模拟式保护中，电压形成既可以用上述回路连接的办法实现，也可用模拟加、减法器通过对测量电压、电流和整定阻抗进行模拟运算的办法实现，具体电路可参考有关资料。

2．数字式保护中幅值比较的实现

在数字式保护中，幅值比较既可以用电压的形式实现，也可以用阻抗的形式实现。来自 TV 的测量电压和来自 TA 的测量电流分别通过各自的模拟量输入回路送到 A/D 转换器，转换成数字信号，由微型计算机计算出相量 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{I}_m$。若用电压比较算法，则直接根据动作特性要求用软件形成两个比较电压，并比较它们的大小，决定是否动作；若采用阻抗比较算法，则应先算出 Z_m，然后按动作特性要求形成两个比较阻抗，判断它们的大小，决定是否动作。

可见，数字式保护中实现绝对比较的关键是计算 $\dot{U}_m$、$\dot{I}_m$ 或 Z_m。它们可以分别由两点积算法、导数算法、傅氏算法和解微分方程算法等方法算出，具体的计算方法见第 9 章，此处仅以用傅氏算法为例简要说明。

应用傅氏算法，数字式保护可以方便的从电压、电流的采样值中计算出测量电压和测量电流基波相量的实部和虚部，从而进一步可以算出基波测量电压、测量电流和测量阻抗。

设由傅氏算法算出的电压和电流实、虚部分别用 U_R、U_I、和 I_R、I_I 表示，则

$$\dot{U}_m = \dot{U}_R + j\dot{U}_I = U_m\angle\varphi_U \tag{3-41}$$

$$\dot{I}_{\mathrm{m}}=\dot{I}_{\mathrm{R}}+j\dot{I}_{\mathrm{I}}=I_{\mathrm{m}}\angle\varphi_{\mathrm{I}} \tag{3-42}$$

$$Z_{\mathrm{m}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m}}}{\dot{I}_{\mathrm{m}}}=\frac{U_{\mathrm{R}}+jU_{\mathrm{I}}}{I_{\mathrm{R}}+jI_{\mathrm{I}}}=\frac{U_{\mathrm{R}}I_{\mathrm{R}}+U_{\mathrm{I}}I_{\mathrm{I}}}{I_{\mathrm{R}}^{2}+I_{\mathrm{I}}^{2}}+j\frac{U_{\mathrm{I}}I_{\mathrm{R}}-U_{\mathrm{R}}I_{\mathrm{I}}}{I_{\mathrm{R}}^{2}+I_{\mathrm{I}}^{2}}=R_{\mathrm{m}}+jX_{\mathrm{m}} \tag{3-43}$$

或

$$Z_{\mathrm{m}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m}}}{\dot{I}_{\mathrm{m}}}=\frac{U_{\mathrm{m}}}{I_{\mathrm{m}}}\angle(\varphi_{\mathrm{U}}-\varphi_{\mathrm{I}})=\left|Z_{\mathrm{m}}\right|\angle\varphi_{\mathrm{m}} \tag{3-44}$$

式中　$\dot{U}_{\mathrm{m}}$、I_{m}——测量电压、电流基波的有效值；

φ_{U}、φ_{I}——测量电压、电流基波的相角；

R_{m}、X_{m}——测量阻抗的实、虚部；

$\left|Z_{\mathrm{m}}\right|$、$\varphi_{\mathrm{m}}$——测量阻抗的阻抗值和阻抗角。

3.3.2 相位比较原理的实现

令 $\dot{C}=\dot{I}_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{C}}=\dot{U}_{\mathrm{C}}$，$\dot{D}=\dot{I}_{\mathrm{m}}Z_{\mathrm{D}}=\dot{U}_{\mathrm{D}}$，则式（3-15）又可以表示为

$$-90^{\circ}\le\arg\frac{\dot{U}_{\mathrm{C}}}{\dot{U}_{\mathrm{D}}}\le 90^{\circ} \tag{3-45}$$

式（3-45）称为电压形式相位比较方程。

1．模拟式保护中相位比较的实现

与幅值比较原理的实现方程类似，模拟式保护的相位比较原理也是以电压比较的形式实现的。它也应根据动作特性的需要，首先形成两个参与相位比较的电压量 $\dot{U}_{\mathrm{C}}$ 与 $\dot{U}_{\mathrm{D}}$，然后在相位比较电路中比较两者的相位关系，满足式（3-45）时，发出动作信号。

电压的形成也有依靠回路串、并联连接和用模拟加减法器运算两种方式，此处只讨论第一种方式。仍以圆特性的方向阻抗元件为例，比较电压可由图 3.19 所示的回路连接形成。

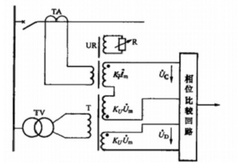


图 3.19 相位比较的电压形成回路图

在图 3.19 中，电压变换器 T 有两个输出绕组，输出的电压均为 $K_{\mathrm{U}}\dot{U}_{\mathrm{m}}$；电抗互感器 UR 也有两个输出绕组，其中一个的输出电压为 $K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}$，另一个绕组接相角调节电阻。按照图示的连接，可以得到

$$\dot{U}_{\mathrm{C}}=K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}-K_{\mathrm{U}}\dot{U}_{\mathrm{m}} \tag{3-46}$$

$$\dot{U}_D = K_U \dot{U}_m \tag{3-47}$$

相位比较回路动作条件为

$$-90^\circ \le \arg \frac{K_I \dot{I}_m - K_U \dot{U}_m}{K_U \dot{U}_m} \le 90^\circ \tag{3-48}$$

式（3-48）分子、分母同除以 $K_U \dot{I}_m$，并令 $\frac{K_I}{K_U} = Z_{set}$，就可以得到式（3-26）的形式，即用阻抗表示的方向阻抗特性。

2．数字式保护中相位比较的实现

在数字式保护中，相位比较既可以用阻抗的形式实现，也可以用电压的形式实现。在用阻抗比较的情况下，首先应用上述的阻抗算法，算出系统故障时的测量阻抗 Z_m，然后根据特性要求与已知的整定阻抗一起，组合出比较阻抗 Z_C 和 Z_D，直接代入动作条件的一般表达式（3-15），根据是否满足动作条件，决定是否动作。

在用电压比较方式的情况下，又可以分为相量比较和瞬时采样值比较两种，现分别予以讨论。

1） 相量比较方式

电力系统故障时，微机保护装置首先应用傅氏算法等计算方法，算出保护安装处的测量电压 $\dot{U}_m$ 和测量电流 $\dot{I}_m$，然后根据动作特性的要求算出相量 $\dot{U}_C$ 和 $\dot{U}_D$。

在复平面上，$\dot{U}_C$ 和 $\dot{U}_D$ 即可用幅值和相角表示为极坐标的形式，也可以用实部和虚部表示为直角坐标的形式，即

$$\dot{U}_C = U_C \angle \varphi_C = U_{CR} + jU_{CI} \tag{3-49a}$$

$$\dot{U}_D = U_D \angle \varphi_D = U_{DR} + jU_{DI} \tag{3-49b}$$

即 $\dot{U}_C$ 和 $\dot{U}_D$ 两个比较相量之间的相位差为 $\varphi_C - \varphi_D$。各种不同的相位比较方程，就是判断该相位差是否在给定的动作边界和范围之内。

（1） 动作范围为-90°～＋90°。此时相位比较动作的条件为

$$-90^\circ \le \varphi_C - \varphi_D \le 90^\circ \tag{3-50}$$

即

$$\cos(\varphi_C - \varphi_D) \ge 0 \tag{3-51}$$

式（3-51）左端展开，并在两端同乘以 $|\dot{U}_C||\dot{U}_D|$，得到

$$|\dot{U}_C||\dot{U}_D|\cos(\varphi_C - \varphi_D) = |\dot{U}_C|\cos\varphi_C |\dot{U}_D|\cos\varphi_D + |\dot{U}_C|\sin\varphi_C |\dot{U}_D|\sin\varphi_D$$

$$= U_{CR}U_{DR} + U_{CI}U_{DI} \ge 0$$

即比相动作的条件可以表示为

$$U_{CR}U_{DR}+U_{CI}U_{DI} \geq 0 \quad (3\text{-}52)$$

由于该式是通过$\dot{U}_C$和$\dot{U}_D$相角差余弦的形式导出的，所以它又称为余弦型相位比较判据。

式（3-52）还可以通过下面的方法导出。在用直角坐标表示的情况下，$\dot{U}_C$，$\dot{U}_D$之比可以表示为

$$\frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_D}=\frac{U_{CR}+jU_{CI}}{U_{DR}+jU_{DI}}=\frac{(U_{CR}U_{DR}+U_{CI}U_{DI})+j(U_{DR}U_{CI}-U_{CR}U_{DI})}{U_{DR}^2+U_{DI}^2}$$

即$\dot{U}_C$、$\dot{U}_D$之比是一个无量纲的相量。在复平面上，$\dot{U}_C$、$\dot{U}_D$之间的夹角在（-90^0～$+90^0$）范围内的判断，即式（3-45）所示的比相动作条件，等价于该相量的实部大于 0，所以动作的条件可以表示为

$$\frac{(U_{CR}U_{DR}+U_{CI}U_{DI})}{U_{DR}^2+U_{DI}^2} \geq 0 \quad (3\text{-}53)$$

在$\dot{U}_D \neq 0$的情况下，它与式（3-52）完全等同。

（2）动作范围为 0^0～180^0。此时相位比较动作的条件为

$$0^0 \leq \varphi_C\text{-}\varphi_D \leq 180^0 \quad (3\text{-}54)$$

即

$$\sin(\varphi_C\text{-}\varphi_D) \geq 0 \quad (3\text{-}55)$$

式（3-55）左端展开，并在两端同乘以$|\dot{U}_C||\dot{U}_D|$，得到

$$|\dot{U}_C||\dot{U}_D|\sin(\varphi_C\text{-}\varphi_D)=|\dot{U}_C|\sin\varphi_C|\dot{U}_D|\cos\varphi_D\text{-}|\dot{U}_C|\cos\varphi_C|\dot{U}_D|\sin\varphi_D$$

$$=U_{CI}U_{DR}-U_{CR}U_{DI} \geq 0$$

则比相动作的条件可以表示为

$$U_{CI}U_{DR}-U_{CR}U_{DI} \geq 0 \quad (3\text{-}56)$$

由于该式是通过$\dot{U}_C$ 和$\dot{U}_D$相角差正弦的形式导出的，所以它又可以称为正弦型相位比较判据。

也可以理解为$\dot{U}_C$ 、$\dot{U}_D$之间的夹角在（0^0～180^0）范围内的判断，等价$\dot{U}_C$、$\dot{U}_D$之比相量的虚部大于 0。

2） 瞬时采样值比较方式

与比较电压$\dot{U}_C$、$\dot{U}_D$对应的瞬时电压可以表示为

$$\left.\begin{aligned} u_{\mathrm{C}} &= \sqrt{2}U_{\mathrm{C}}\sin(\omega t+\varphi_{\mathrm{C}}) \\ u_{\mathrm{D}} &= \sqrt{2}U_{\mathrm{D}}\sin(\omega t+\varphi_{\mathrm{D}}) \end{aligned}\right\} \tag{3-57}$$

若当前的采样时刻为 n，则当前时刻的采样值表示为

$$\left.\begin{aligned} u_{\mathrm{C}}(n) &= \sqrt{2}U_{\mathrm{C}}\sin(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{C}}) \\ u_{\mathrm{D}}(n) &= \sqrt{2}U_{\mathrm{D}}\sin(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{D}}) \end{aligned}\right\} \tag{3-58}$$

工频$\frac{1}{4}$周期以前时刻的采样值表示为

$$\left.\begin{aligned} u_{\mathrm{C}}(n-\frac{N}{4}) &= \sqrt{2}U_{\mathrm{C}}\sin\left[\omega(t_{\mathrm{n}}-\frac{T}{4})+\varphi_{\mathrm{C}}\right] = -\sqrt{2}U_{\mathrm{C}}\cos(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{C}}) \\ u_{\mathrm{D}}(n-\frac{N}{4}) &= \sqrt{2}U_{\mathrm{D}}\sin\left[\omega(t_{\mathrm{n}}-\frac{T}{4})+\varphi_{\mathrm{D}}\right] = -\sqrt{2}U_{\mathrm{D}}\cos(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{D}}) \end{aligned}\right\} \tag{3-59}$$

式（3-58）和式（3-59）中的对应项平方相加，可得

$$\left.\begin{aligned} u_{\mathrm{C}}^2(n)+u_{\mathrm{C}}^2(n-\frac{N}{4}) &= 2U_{\mathrm{C}}^2 \\ u_{\mathrm{D}}^2(n)+u_{\mathrm{D}}^2(n-\frac{N}{4}) &= 2U_{\mathrm{D}}^2 \end{aligned}\right\} \tag{3-60}$$

式（3-58）和式（3-59）中的对应项相除，可得

$$\left.\begin{aligned} \frac{u_{\mathrm{C}}(n)}{-u_{\mathrm{C}}(n-\frac{N}{4})} &= \tan(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{C}}) \\ \frac{u_{\mathrm{D}}(n)}{-u_{\mathrm{D}}(n-\frac{N}{4})} &= \tan(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{D}}) \end{aligned}\right\} \tag{3-61}$$

若令$U_{\mathrm{CI}}=u_{\mathrm{C}}(n)$、$U_{\mathrm{CR}}=-u_{\mathrm{C}}(n-\frac{N}{4})$、$U_{\mathrm{DI}}=u_{\mathrm{D}}(n)$、$U_{\mathrm{DR}}=-u_{\mathrm{D}}(n-\frac{N}{4})$

则式（3-60）、式（3-61）两式可以简写为

$$\left.\begin{aligned} U_{\mathrm{CI}}^2+U_{\mathrm{CR}}^2 &= 2U_{\mathrm{C}}^2 \\ U_{\mathrm{DI}}^2+U_{\mathrm{DR}}^2 &= 2U_{\mathrm{D}}^2 \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{U_{\mathrm{CI}}}{U_{\mathrm{CR}}} &= \tan(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{C}}) \\ \frac{U_{\mathrm{DI}}}{U_{\mathrm{DR}}} &= \tan(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{D}}) \end{aligned}\right\}$$

即 U_{CR}、U_{CI} 可以看作是幅值为 U_{C}、相角为$(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{C}})$的相量$\dot{U}_{\mathrm{C}}$的实部和虚部；$U_{\mathrm{DR}}$、$U_{\mathrm{DI}}$可以看作式幅值为$U_{\mathrm{D}}$、相角为$(\omega t_{\mathrm{n}}+\varphi_{\mathrm{D}})$的相量$\dot{U}_{\mathrm{D}}$的实部和虚部。将它们分别代入式（3-52）和式（3-56），就可以得到用瞬时采样值表示的余弦比相方程和正弦比相方程分别为

$$u_{\mathrm{C}}(n-\frac{N}{4})u_{\mathrm{D}}(n-\frac{N}{4})+u_{\mathrm{C}}(n)u_{\mathrm{D}}(n)\geq 0 \tag{3-62}$$

$$u_{\mathrm{C}}(n-\frac{N}{4})u_{\mathrm{D}}(n)-u_{\mathrm{C}}(n)u_{\mathrm{D}}(n-\frac{N}{4})\geq 0 \tag{3-63}$$

这种算法只需要用相隔$\frac{1}{4}$工频周期的两个采样值就可以完成比相，故可称为比相的两点积算法。由于该方法用瞬时值比相，受输入量中的谐波等干扰信号的影响较大，故必须先用数字滤波算法滤除输入中的干扰信号，然后再进行比相。有关数字滤波的方法见第 9 章。

3.3.3 阻抗继电器的精确工作电流和精确工作电压

在上面讨论的阻抗继电器的动作特性中，仅仅考虑了测量电压与测量电流间的相对关系，并没有考虑它们自身的大小。在实际中，阻抗继电器动作的情况不仅与测量电压、电流之间的相对关系有关，同时与它们自身的大小有关。

在传统的模拟式保护中，阻抗继电器的整定阻抗是由电抗互感器 UR 的变换系数K_{I}和电压变换器 T 的变比系数K_{U}决定的。电压变换器的线性程度较好，其变比K_{U}可近似认为是常数，但电抗互感器的线性度较差，当输入的电流较小时，其特性处于磁化曲线的起始部分，变换系数K_{I}较小；而当输入电流很大时，其铁芯饱和，变换系数K_{I}也将变小，只有输入电流在一个适当的范围内时，变换系数K_{I}才可以看作是一个常数。这样在输入电流较小或较大时，相当于继电器的整定阻抗变小，从而使其动作阻抗也将变小，即整个动作区将变小。

为保证动作的可靠性，实现幅值比较原理的比较电路有一定的动作门槛，即只有$\left|\dot{U}_{\mathrm{A}}\right|$与$\left|\dot{U}_{\mathrm{B}}\right|$之差大于一个固定门槛值$U_0$时才会动作。对于具有圆特性的方向阻抗继电器，$\dot{U}_{\mathrm{A}}=\frac{1}{2}K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}$，$\dot{U}_{\mathrm{B}}=\frac{1}{2}K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}-K_{\mathrm{U}}\dot{U}_{\mathrm{m}}$,实际继电器动作的条件应表示为

$$\left|\frac{1}{2}K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}\right|-\left|\frac{1}{2}K_{\mathrm{I}}\dot{I}_{\mathrm{m}}-K_{\mathrm{U}}\dot{U}_{\mathrm{m}}\right|\geq U_0 \tag{3-64}$$

两侧同除以$\left|K_{\mathrm{U}}\dot{I}_{\mathrm{m}}\right|$，并用$Z_{\mathrm{m}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m}}}{\dot{I}_{\mathrm{m}}}$，$Z_{\mathrm{set}}=\frac{K_{\mathrm{I}}}{K_{\mathrm{U}}}$代入后，可得

$$\left|\frac{1}{2}Z_{\mathrm{set}}\right|-\left|\frac{1}{2}Z_{\mathrm{set}}-Z_{\mathrm{m}}\right|\geq\frac{U_0}{\left|K_{\mathrm{U}}\dot{I}_{\mathrm{m}}\right|} \tag{3-65}$$

在保护区的末端附近金属性短路的情况下，测量阻抗Z_{m}的阻抗角与整定阻抗Z_{set}的阻抗角相等，且Z_{m}的阻抗值大于整定值的$\frac{1}{2}$，这时式（3-65）中的$-\left|\frac{1}{2}Z_{\mathrm{set}}-Z_{\mathrm{m}}\right|=\left|\frac{1}{2}Z_{\mathrm{set}}\right|-\left|Z_{\mathrm{m}}\right|$，所以式（3-64）又可表示为

$$\left|Z_{\mathrm{m}}\right| \leq \left|Z_{\mathrm{set}}\right| - \frac{U_0}{\left|K_{\mathrm{U}}\dot{I}_{\mathrm{m}}\right|} \tag{3-66}$$

使继电器的测量阻抗处于临界动作状态，就是继电器的动作阻抗，记为Z_{op}，显然

$$\left|Z_{\mathrm{op}}\right| = \left|Z_{\mathrm{set}}\right| - \frac{U_0}{\left|K_{\mathrm{U}}\dot{I}_{\mathrm{m}}\right|} \tag{3-67}$$

理论上此时的整定阻抗处于继电器的动作边缘，继电器的整定阻抗应该等于动作阻抗，但是由于以上误差及动作门槛，继电器实际的动作阻抗与输入电流的关系如图 3.20 所示。

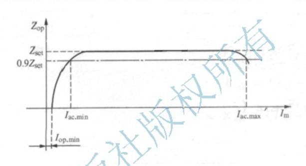


图 3. 20　动作阻抗随测量电流变化的曲线

在图 3.20 中，$I_{\mathrm{op.min}}$ 是使动作阻抗降为 0 对应的测量电流，称为最小动作电流，实际电流小于 $I_{\mathrm{op.min}}$ 时，无论测量阻抗为多少，测量元件都不会动作。$I_{\mathrm{ac.min}}$ 和 $I_{\mathrm{ac.max}}$ 都是使动作阻抗降为$0.9Z_{\mathrm{set}}$ 对应的测量电流，$I_{\mathrm{ac.min}}$ 为阻抗继电器的最小精确工作电流，$I_{\mathrm{ac.max}}$ 为阻抗继电器的最大精确工作电流，从而有

$$Z_{\mathrm{op}} = 0.9\left|Z_{\mathrm{set}}\right| = \left|Z_{\mathrm{set}}\right| - \frac{U_0}{\left|K_{\mathrm{U}}\dot{I}_{\mathrm{ac.min}}\right|} \tag{3-68}$$

$$0.1\left|Z_{\mathrm{set}}\right| = \frac{U_0}{K_{\mathrm{U}}I_{\mathrm{ac.min}}}$$

最小精确工作电流与整定阻抗值的乘积称为阻抗继电器的最小精确工作电压，常用$U_{\mathrm{ac.min}}$ 表示，即

$$U_{\mathrm{ac.min}} = I_{\mathrm{ac.min}}\left|Z_{\mathrm{set}}\right| = \left|\frac{10U_0}{K_{\mathrm{U}}}\right| \tag{3-69}$$

只有实际的测量电流在最小和最大精确工作电流之间，测量电压在最小精确工作电压以上时，三段式距离保护才能准确地配合工作，其误差已被考虑在可靠系数中。最小精确工作电流是距离保护测量元件的一个重要参数，愈小愈好。

测量元件精确工作电流的校验，一般是指对最小精确工作电流的校验。要求在保护区内发生短路

时，通入继电器的最小电流不小于最小精确工作电流，并留有一定的裕度，裕度系数不小于 1.5～2，即

$$K_{\text{mar}}=\frac{I_{\text{k.min}}}{I_{\text{ac.min}}}>1.5\sim2 \tag{3-70}$$

在出口短路时的测量阻抗很小，动作阻抗的变化一般不会影响保护的正确动作，所以最大精确工作电流一般不必校验。

在阻抗继电器应用于较短线路时，由于线路末端短路时测量电压可能较低，需对最小精确工作电压进行校验。线路较长时，一般不用校验精确工作电压。

3.4　影响距离保护正确工作的因素

3.4.1 概述

在距离保护中，最根本的要求是阻抗继电器能正确测量短路点至保护安装处的距离。当故障发生在保护区内时，测量的阻抗应小于动作阻抗，继电器动作，当故障发生在区外时，测量阻抗大于动作阻抗，继电器应不动作，从而保证选择性。为了保证这一要求的实现，除了采用正确的接线方式外，还应充分考虑在实际运行中保护装置会受到一些不利因素的影响，使之发生误动。一般来说，影响距离保护正确动作的因素主要有：

（1）　短路点的过渡电阻；
（2）　在短路点与保护安装处之间有分支电路；
（3）　电力系统振荡；
（4）　测量互感器误差；
（5）　电网频率的变化；
（6）　在 Y/△-11 变压器后发生短路故障；
（7）　线路串联补偿电容的影响；
（8）　过渡过程及二次回路断线；
（9）　平行双回路互感的影响等。

由于这些因素的影响，使阻抗继电器将发生不正确动作，为此必须对这些影响的因素加以分析研究，然后采取适当措施予以防止。对于第（4）项，阻抗继电器是通过电流互感器和电压互感器接入电气量的，测量互感器的变比误差和角误差必然给阻抗继电器的正确测量带来影响，关于这种影响通常在计算阻抗继电器的动作阻抗时，用可靠系数来考虑；对于第（5）项，在相位比较方向阻抗继电器中，用记忆极化电压作为一个比较量，由于电压记忆回路是调整在额定工频下谐振，因此对系统频率的变化最为敏感。当系统的工作频率与谐振频率发生偏移时，将使阻抗继电器特性曲线在阻抗复平面向左、右方向偏移；对于第（6）项，当保护安装处与短路点具有 Y/△接线变压器时，阻抗继电器的工作将受变压器的阻抗和一、二次电压相角差的影响。例如方向阻抗继电器对 Y/△变压器另一侧的两相短路反应能力很差，一般不能起后备作用；对于第（7）项，在线路或变电所内装设串联补偿电容后，破坏了阻抗继电器的测量阻抗与距离成比例的关系，同时它的电抗部分还会改变符号，使保护的方向性被破坏，对阻抗继电器的正确工作带来影响；对于第（8）项，在电力系统正常运行中，电压互感器的一次回路或二次回路有可能出现断线的情况，当电压回路断线后，二次侧接至保护回路的相电压或线电压都可能降低至零，由于这时电力系统处于正常运行状态，仍然有负荷电流，所以测量阻抗可能小于动作阻抗，使阻抗继电器可能误动作；对于第（9）项，当发生接地短路故障时，双回线路中的接地阻抗继电器的测量阻抗，受双回线路零序互阻抗的影响，产生阻抗测量上的误差。

以上对第（4）至（9）项影响因素作了概略说明，下面着重分析第（1）至第（3）项影响因素。

3.4.2　过渡电阻对距离保护的影响

1．短路点过渡电阻的特性

在此之前，分析和整定继电保护装置时，都是用金属性短路作为依据（不计短路点的过渡电阻）。

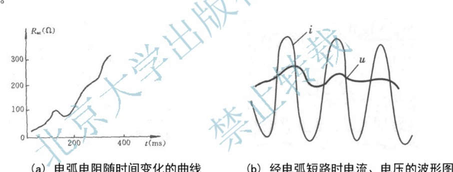
然而，在实际的电力系统中，当发生相间短路或接地短路时，短路点通常具有阻抗，例如电弧电阻、外物电阻、导线和大地间的电阻（当导线落地时）、杆塔接地电阻以及利用木质绝缘的木杆电阻等。分析和实验表明：这些电抗是电阻性的，因此常称之为过渡电阻。显然，过渡电阻的存在，将使阻抗继电器的测量阻抗发生变化，影响距离保护的正确动作。在一般情况下使测量电阻增大，距离保护Ⅰ段保护范围缩短，距离Ⅱ段保护灵敏度降低，但有时也可能引起保护超范围动作或反方向误动。

在相间短路时，过渡电阻主要由电弧电阻组成。电弧电阻具有非线性特性,其大小与电弧弧道的长度成正比,与电弧电流的大小成反比。国外进行的一系列实验表明，当故障电流相当大时（数百安以上），电弧上的电压梯度几乎和电流无关（电位梯度即单位长度上的电位差），其最大值约为 1.4～1.5kV/m。设电弧的长度为 l_{ac} (m)，电弧电流的有效值为 I_{ac}（A），则电弧电阻的数值为

$$R_{ac} \approx 1050 \frac{l_{ac}}{I_{ac}} \quad \Omega \tag{3-71}$$

电弧的长度和电流是随时间而变的，一般来说，短路初始瞬间电流最大，电弧长度最小，电弧电阻的数值最小，而后，经过几个周期，由于短路点的空气流动和电动力的作用，电弧将随时间拉长，致使电弧电阻增大，起始增大较慢，大约经过 0.1～0.5s 之后，将剧烈上升，如图 3.21（a）所示。相间故障的电弧电阻一般在数欧至十几欧之间。

在接地短路时，除电弧电阻外，主要由杆塔接地电阻和杆塔电阻等组成。杆塔的接地电阻与大地导电率有关，对于跨越山区的高压线路，铁塔的接地电阻可达数十欧。当导线通过树木或其他物体对地短路时，过渡电阻更高。对于 500kV 线路，最大过渡电阻可达 300Ω，对 220kV 线路最大过渡电阻可达 100Ω。



（a）电弧电阻随时间变化的曲线　　（b）经电弧短路时电流、电压的波形图

图 3.21 短路时产生的电弧

短路点的过渡电阻将影响电流、电压值以及电流与电压间的相位角，由于 R_{ac} 是非线性的，还可能使残余电压的波形发生畸变，如图 3.21（b）所示。由此可见，过渡电阻的存在，使距离保护装置的工作特性变坏。

2．过渡电阻对距离保护的影响

1）单侧电源网络

图 3.22 为单侧电源网络通过过渡电阻 R_t 短路的情况。很明显由于过渡电阻 R_t 的存在，必然使测量阻抗增大，保护范围缩小。

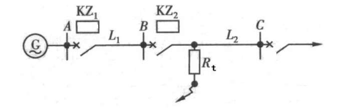


图 3.22　经过过渡电阻 R_t 短路示意图

过渡电阻的存在，给距离保护的性能带来较大的影响，但对不同地点的保护装置影响是不一样的。

例如，在图 3.22 所示的单侧电源网络中，当线路 L_2 的出口通过 R_t 短路时，L_1、L_2 两条线路上的距离保护装置的测量阻抗分别是：

$$KZ2：\quad Z_{K2}=R_t \tag{3-72}$$

$$KZ1：\quad Z_{K1}=Z_{L1}+R_t \tag{3-73}$$

式中 Z_{L1}——线路 L_1 的阻抗。

由式（3-72）和式（3-73）可见，KZ1 和 KZ2 测量阻抗比在同一点发生金属性短路时，均有所增大，但增大的情况有所不同，其中 KZ2 测量阻抗增大的数值就等于 R_t，而 KZ1 的测量阻抗等于 Z_{L1} 和 R_t 的相量和，增加得较少，增大的数值小于 R_t，也就是受 R_t 影响小。

当过渡电阻 R_t 的数值较大时，可能导致距离保护装置的无选择性动作。例如，图 3.22 所示之网络，在线路 L_1 和 L_2 上装设由圆特性方向阻抗继电器作为测量元件的距离保护，其动作特性及过渡电阻对安装在不同地点阻抗继电器的影响示于图 3.23 中。

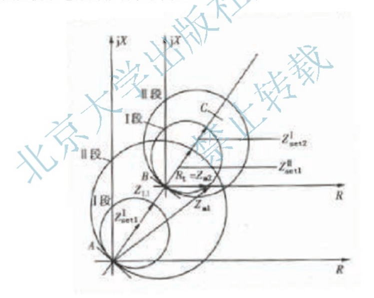


图 3.23　单侧电源网络过渡电阻对不同安装地点距离保护影响情况分析图

由图可见，当 R_t 数值较大时，KZ_2 的测量阻抗 $Z_{K2}=R_t$，其矢端落于其Ⅰ段的动作特性圆外，但仍在其Ⅱ段圆内，而 KZ_1 的测量阻抗 Z_{K1} 尚在其Ⅱ段动作特性圆内，因此 KZ_1 和 KZ_2 将同时以Ⅱ段时限跳闸，造成了越级跳闸，失去了选择性。

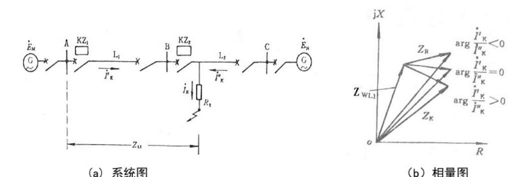
当过渡电阻 R_t 的数值更大时，KZ_1 和 KZ_2 两个保护都可能以Ⅲ段时限动作。

以上分析充分说明，过渡电阻的数值对阻抗元件工作的影响较大，同时保护装置的整定值越小，则相对的受过渡电阻的影响越大。在短线上的距离保护装置应特别注意过渡电阻的影响，在校验距离元件的灵敏度时，应该计及过渡电阻的影响因素。

2）双侧电源的网络

在双侧电源的网络中，阻抗继电器的工作性能与过渡电阻的关系比较复杂。对如图 3.24 所示双侧

电源的线路，短路点的过渡电阻可能使测量阻抗增大，也可能使测量阻抗减小。



（a）系统图　　　　（b）相量图

图 3. 24 双侧电源网络经过渡电阻短路时对测量阻抗的影响

当由双侧电源供电，在线路 L_2 出口经过渡电阻 R_t 短路时，两侧电源均向短路点供给短路电流和 $\dot{I}''_K$，流经过渡电阻的电流为 $\dot{I}'_K+\dot{I}''_K$，此时，过渡电阻 R_t 上的电压降为

$$\dot{U}_R=\left(\dot{I}'_K+\dot{I}''_K\right)R_t \tag{3-74}$$

M 侧阻抗继电器 KZ_1 的测量阻抗为

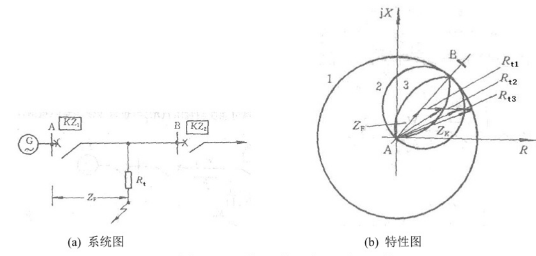
$$Z_{K1}=\frac{\dot{I}'_K Z_{L_1}+\left(\dot{I}'_K+\dot{I}''_K\right)R_t}{\dot{I}'_K}=Z_{L_1}+\frac{\dot{I}'_K+\dot{I}''_K}{\dot{I}'_K}\cdot R_t \tag{3-75}$$

由于两侧电源电势之间存在有相角差，电流 $\dot{I}'_K$ 和 $\dot{I}''_K$ 相位不同，因此，$\dfrac{R_t(\dot{I}'_K+\dot{I}''_K)}{\dot{I}'_K}$ 是一个复数，它代表测量阻抗的变化量，称为附加测量阻抗，它不是纯电阻性的。

当 $\dot{I}'_K$ 的相位落后于 $\dot{I}''_K$ 的相位（即 $\arg\dfrac{\dot{I}'_K}{\dot{I}''_K}<0$）时，过渡电阻引起的附加分量，将使测量阻抗的电抗成分增大（图 3.24（b）中 Z_R 呈感性，有正的虚部，相量 Z_R 向上倾斜），造成保护范围缩短。

当 $\dot{I}'_K$ 的相位超前于 $\dot{I}''_K$ 的相位，则 $\arg\dfrac{\dot{I}'_K}{\dot{I}''_K}>0$，过电阻引起的附加分量，将使测量阻抗的电抗成份减小（Z_R 呈容性，向下倾斜），则实际的保护区将比整定值要大，可能导致超范围的动作。

3) 过渡电阻对不同动作特性阻抗继电器的影响



(a) 系统图　　　　　　　　　　　　(b) 特性图

图 3. 25 过渡电阻对不同特性阻抗继电器影响的比较

在图 3.25 所示的网络中，假定在保护 1 处的距离Ⅰ段采用不同特性的阻抗继电器，它们的整定值选择都一样，即 $Z_{\text{set}}^{\text{I}}=0.85Z_{\text{AB}}$。如果在距离Ⅰ段保护范围内阻抗为 Z_{F} 处，通过电阻 R_{t} 发生短路，则保护 KZ_1 的测量阻抗为

$$Z_{\text{K1}}=Z_{\text{F}}+R_{\text{t}} \tag{3-76}$$

由图 3.25（b）可见，当 R_{t} 达到 R_{t1} 时，具有椭圆特性的阻抗继电器开始拒动；达到 R_{t2} 时，方向阻抗继电器开始拒动；达到 R_{t3} 时，全阻抗继电器开始拒动。这就说明各种特性阻抗继电器对过渡电阻的敏感程度不一样，椭圆特性阻抗继电器动作特性在复数阻抗平面＋R 轴方向面积最小，对过渡电阻最敏感，受其影响最大；全阻抗继电器动作特性在＋R 轴方向面积最大，受其影响最小。因此，一般来说，阻抗继电器的动作特性在＋R 轴方向所占面积越大，则受过渡电阻 R_{t} 的影响也就越小。

3．防止过渡电阻影响的措施

1)　采用瞬时测量装置

对于相间短路，过渡电阻一般为电弧电阻，具有纯电阻性质。由图 3-21 电弧电阻随时间变化关系曲线已经知道，电弧电阻在短路的初瞬间，R_{ac} 最小，在短路 0.1～0.15s 之后将急剧增大。由这一特点可见，过渡电阻对距离保护的第Ⅰ段影响较小，但是对于距离保护的第Ⅱ段，由于它的动作是带时限的（动作时限不小于 0.5s），所以过渡电阻对距离Ⅱ段影响较大。为了克服这种影响，通常在距离Ⅱ段上装设“瞬时测量装置”。所谓“瞬时测量”就是将测量元件的初始动作状态，通过启动元件的动作将其固定下来。此后，当距离元件因短路点过渡电阻 R_{t} 增大使测量元件返回时，保护仍可通过“瞬时测量”装置按原整定时间动作于跳闸。

以上分析说明，采用“瞬时测量”是克服过渡电阻影响的有效措施。因而在实际的距离保护装置中得到了广泛应用。但是应当注意，一般只在单回线辐射型电网中带时限的Ⅱ段上采用，对于距离保护的Ⅰ段，因为动作时间短，过渡电阻的数值小，没有必要装设瞬时测量电路。当相邻线路为平行线路或单回线与环网相接时，则在该线路上就不能采用瞬时测量的方法来防止过渡电阻的影响，否则可造成保护的非选择性动作。

2)　采用阻抗特性圆偏移的方法

采用能容许较大的过渡电阻而又不致拒动的阻抗继电器，如电抗型继电器、四边形动作特性的继电器、偏移特性阻抗继电器等，从而达到减小过渡电阻的影响。

3.4.3 分支电路对距离保护的影响

当保护安装处与短路点有分支线时，分支电流对阻抗继电器的测量阻抗有影响，现分两种情况予以分析。

1．助增电流的影响

图 3.26 为助增电流对测量阻抗影响的示意图。当线路 BD 上 k 点发生短路故障时，由于在短路点 k 和 KZA 之间，还有分支电路 CB 存在，因此 $\dot{E}_A$、$\dot{E}_B$ 两个电源均向短路点提供短路电流。这时故障线路中的电流为 $\dot{I}_{Bk}=\dot{I}_{AB}+\dot{I}_{CB}$，流过非故障线路 CB 的电流为 $\dot{I}_{CB}$，电流 $\dot{I}_{CB}$ 流向故障点，但不流过保护装置 KZA。若短路点 k 在距离保护 KZA 的第Ⅱ段范围内，则此时阻抗继电器 KZA 的测量阻抗为：

$$Z_m=\frac{\dot{I}_{AB}Z_{AB}+\dot{I}_{Bk}Z_{Bk}}{\dot{I}_{AB}}=Z_{AB}+\frac{\dot{I}_{Bk}}{\dot{I}_{AB}}Z_{Bk}$$

$$=Z_{AB}+K_bZ_{Bk} \tag{3-77}$$

式中 K_b 称为分支系数（助增系数），其定义为

$$K_b=\frac{\dot{I}_{Bk}}{\dot{I}_{AB}}$$

一般情况下，K_b 为一复数，但在实用中可近似认为 $\dot{I}_{Bk}$ 与 $\dot{I}_{AB}$ 同相位，因此，可以认为 K_b 为一实数。

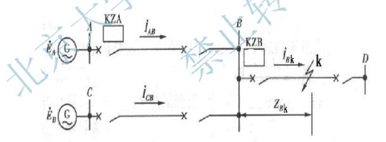


图 3.26 助增电流对阻抗继电器工作的影响

前面分析已经指出，在单侧电源幅射形电网中，继电器的测量阻抗只与短路点到保护安装处之间的距离成正比。但是式（3-77）说明，当短路点与保护安装处有分支电路时，由于分支电流 $\dot{I}_{CB}$ 的存在，使保护 KZA 第Ⅱ段的测量阻抗不仅取决于短路点至安装点的距离，而且还取决于电流 $\dot{I}_{CB}$ 与 $\dot{I}_{AB}$ 的比值，因为$|\dot{I}_{Bk}|>|\dot{I}_{AB}|$，故 $K_b>1$，所以实际增大了测量阻抗（与无分支电路相比）。这种使测量阻抗增大的分支电流 $\dot{I}_{CB}$ 称为助增电流，其分支系数 K_b 亦称之为助增系数。

当助增电流使测量阻抗增大较多时，保护 KZA 的第Ⅱ段可能不动作。因此，助增电流的影响，实际上是降低了保护 KZA 的灵敏度，但并不影响与保护 KZA 的第Ⅰ段配合的选择性，也不影响保护 KZB 第Ⅰ段测量阻抗的正确性。

为了保证保护装置第Ⅱ段保护区的长度不变，在整定保护 KZA 的第Ⅱ段时引入分支系数，适当的增大保护的动作阻抗，以抵消由于助增电流的影响而导致的保护区缩短。

分支系数与系统的运行方式有关，在整定计算时应取实际可能运行方式下的最小值，以保证保护的选择性。因为这样整定后，如果运行方式变化出现较大的分支系数时，使得测量阻抗增大，保护范围缩小，不致于造成非选择性动作。反之，如果取实际可能运行方式下的较大值，则当运行方式变化，使分支系数减小时，将造成阻抗继电器的测量阻抗减小，保护范围伸长，有可能使保护无选择性动作。

２．汲出电流的影响

如果保护安装处与短路点连接的不是分支电源而是负荷或单回线与平行线相连的网络，短路点位于平行线上，则阻抗继电器的测量阻抗亦相应的变化。如图 3.27 所示为单回线与平行线相连的

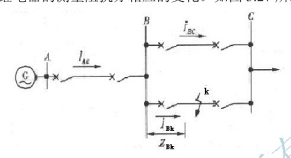


图 3. 27 汲出电流对阻抗继电器工作的影响

网络，当在平行线之一的 k 点发生相间短路时，由 A 侧电源供给短路电流 $\dot{I}_{AB}$ 送至变电所 B 时就分成两路流向短路点 k，其中非故障支路电流为 $\dot{I}_{BC}$，故障支路电流为 $\dot{I}_{Bd}$，它们之间的关系 $\dot{I}_{Bk}=\dot{I}_{AB}-\dot{I}_{BC}$，流过保护装置 KZA 的电流 $\dot{I}_{AB}$ 比故障支路电流 $\dot{I}_{Bk}$ 大。此时距离保护 KZA 第Ⅱ段的测量阻抗为：

$$Z_m=\frac{\dot{I}_{Bd}Z_{Bd}+\dot{I}_{AB}Z_{AB}}{\dot{I}_{AB}}=Z_{AB}+\frac{\dot{I}_{Bk}}{\dot{I}_{AB}}Z_{Bk}$$

$$=Z_{AB}+K_bZ_{Bk} \qquad (3\text{-}78)$$

式中 K_b 称为分支系数（汲出系数）。由于 $|\dot{I}_{Bk}|<|\dot{I}_{AB}|$，所以 $K_b<1$。与无分支电路的情况相比，保护 KZA 的第Ⅱ段测量阻抗有所减小。这种使测量阻抗减小的电流（分支电流 $\dot{I}_{BC}$）称为汲出电流。

由于汲出电流的存在，使测量阻抗减小，也即伸长了保护区的长度。可能造成保护的无选择性动作。为了防止这种非选择性动作，在整定计算时引入一个小于 1 的分支系数，使保护装置 KZA 的第Ⅱ段动作阻抗适当减少，以抵偿由于汲出电流的影响致使保护范围伸长的结果，使保护装置在任何情况下都能保证有选择地动作。

汲出系数也与系统的运行方式有关，在整定计算时仍应采用各种运行方式下最小的汲出系数。

负载电流也属于汲出电流，但与故障电流相比要小得多，其影响可以忽略不计。因为在短路状态下，负载电动机处于低负载情况，其汲出影响并不显著。

综上分析可知，K_b 是一个与电网接线有关的分支系数，其值可能大于 1、等于 1 或小于 1。当 $K_b>1$ 时，阻抗继电器的测量阻抗增大，亦即助增电流的影响使阻抗继电器的灵敏度下降；当 $K_b<1$ 时，阻抗继电器的测量阻抗减小，亦即汲出电流的影响，可能使保护失去选择性。因此正确计及助增电流和汲出电流是保证阻抗继电器正确工作的重要条件之一。为了在各种运行方式下都能保证相邻保护之间的配合关系，应按 K_b 为最小的运行方式来确定距离保护第Ⅱ段的整定值；对于作为相邻线路远后备保

护的距离Ⅲ段保护，其灵敏系数应按助增电流为最大的情况来校验。

3.4.4 电力系统振荡对距离保护的影响

1. 电力系统振荡的基本概念

电力系统未受扰动处于正常运行状态时，系统中所有发电机处于同步运行状态，发电机电势间的相位差δ较小，并且保持恒定不变，此时系统中各处的电压、电流有效值都是常数。当电力系统受到大的扰动或小的干扰而失去运行稳定时，机组间的相对角度随时间不断增大，线路中的潮流亦产生较大的波动。在继电保护范围内，把这种并列运行的电力系统或发电厂失去同步的现象称为振荡。

电力系统发生振荡的原因是多方面的，归纳起来主要有以下几点：

（1）电网的建设规划不周，联系薄弱，线路输送功率超过稳定极限；

（2）系统无功电源不足，引起系统电压降低，没有足够的稳定储备；

（3）大型发电机励磁异常；

（4）短路故障切除过慢引起稳定破坏；

（5）继电保护及自动装置的误动、拒动或性能不良；

（6）过负荷；

（7）防止稳定破坏或恢复稳定的措施不健全及运行管理不善等。

电力系统振荡有周期与非周期之分。周期振荡时，各并列运行的发电机不失去同步，系统仍保持同步，其功角δ在 0^0~120^0 范围内变化；非周期振荡时，各并列运行的发电机失去同步，称为发电机失去稳定，其功角在 0^0~360^0 甚至 720^0 及无限增长的范围内变化。

电力系统振荡是电力系统的重大事故。振荡时，系统中各发电机电势间的相角差发生变化，电压、电流有效值大幅度变化，以这些量为测量对象的各种保护的测量元件就有可能因系统振荡而动作，对用户造成极大的影响，可能使系统瓦解，酿成大面积的停电。但运行经验表明，当系统的电源间失去同步后，他们往往能自行拉入同步，有时当不允许长时间异步运行时，则可在预定的解列点自动或手动解列。显然，在振荡之中不允许继电保护装置误动，应该充分发挥它的作用，消除一部分振荡事故或减少它的影响。为此，必须对系统振荡时的特点及对继电保护的影响加以分析，并进而研究防止振荡对继点保护影响的措施。

为了使问题的分析简单明了，而又不影响结论的正确性，特作如下假设：

（1）将所分析的系统按其电气连接的特点简化为一个具有双侧电源的开式网络；

（2）系统发生全相振荡时，三相仍处于完全对称情况下，不考虑振荡过程中又发生短路的情况，因此可以只取一相来进行分析；

（3） 系统振荡时，两侧系统的电势 $\dot{E}_{\mathrm{M}}$ 和 $\dot{E}_{\mathrm{N}}$ 的幅值相等，相角差以δ表示，δ在 0^0～360^0 之间变化；

（4） 系统各元件的阻抗角相等，总阻抗为

$$Z_{\Sigma}=Z_{\mathrm{M}}+Z_{\mathrm{N}}+Z_{\mathrm{L}}$$

式中 Z_{M} 为 M 侧系统的等值阻抗，Z_{N} 为 N 侧系统的等值阻抗，Z_{L} 为联络线路的阻抗；

（5）振荡过程中不考虑负荷电流的影响。

2. 系统振荡时电流、电压的变化规律

在电力系统中，由于输电线路输送功率大，而超过静稳定极限，或因无功功率不足而引起系统电压降低或因短路故障切除缓慢或因采用非同期自动重合闸不成功时，都可能引起系统振荡。

下面以图 3.28(a)所示的两侧电源辐射形网络图为例，说明系统振荡时各电气量的变化。如在系统全相运行时发生振荡，由于总是对称状态，故可按单相系统来分析。

图 3.28(a)中给出了系统和线路的参数及电压、电流的参考方向。如以电动势 $\dot{E}_{\mathrm{M}}$ 为参考，使其相

位为零，则 $\dot{E}_{\mathrm{M}}=E_{\mathrm{M}}$。在系统振荡时，可认为 N 侧系统等值电动势 $\dot{E}_{\mathrm{N}}$ 围绕 $\dot{E}_{\mathrm{M}}$ 旋转或摆动。因此，$\dot{E}_{\mathrm{N}}$ 落后于 $\dot{E}_{\mathrm{M}}$ 之角度 δ 在 0^0～360^0 之间变化，即

$$\dot{E}_{\mathrm{N}}=E_{\mathrm{M}}\,e^{-\mathrm{j}\delta} \tag{3-79}$$

由此电动势产生的由 M 侧流向 N 侧的电流（又称为振荡电流）为

$$\dot{I}_{\mathrm{M}}=\frac{\dot{E}_{\mathrm{M}}-\dot{E}_{\mathrm{N}}}{Z_{\Sigma}}=\frac{\Delta\dot{E}}{Z_{\Sigma}}=\frac{\dot{E}_{\mathrm{M}}(1-e^{-\mathrm{j}\delta})}{Z_{\Sigma}} \tag{3-80}$$

该电流滞后于 $\Delta\dot{E}=\dot{E}_{\mathrm{M}}-\dot{E}_{\mathrm{N}}$ 的角度为系统总阻抗 Z_{Σ} 的阻抗角 φ_z，

$$\varphi_z=\arctan\frac{X_{\mathrm{M}}+X_{\mathrm{L}}+X_{\mathrm{N}}}{R_{\mathrm{M}}+R_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{N}}}=\frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \tag{3-81}$$

由此可见，当 δ 在 0^0～360^0 范围内变化时，振荡电流的大小和相位都发生变化。振荡电流有效值随 δ 变化的曲线如图 3.29(a)所示。当 $\delta=180^0$ 时，振荡电流的有效值为

$$I_{\mathrm{M.max}}=\frac{\Delta E}{Z_{\Sigma}}=\frac{2E_{\mathrm{M}}}{Z_{\Sigma}}\sin\frac{\delta}{2}=\frac{2E_{\mathrm{M}}}{Z_{\Sigma}} \tag{3-82}$$

系统振荡时，中性点的电位仍保持为零，故线路两侧母线的电压 $\dot{U}_{\mathrm{M}}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{N}}$ 分别为

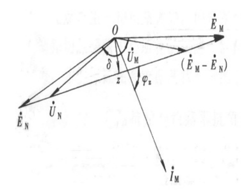
$$\dot{U}_{\mathrm{M}}=\dot{E}_{\mathrm{M}}-\dot{I}Z_{\mathrm{M}} \tag{3-83}$$

$$\dot{U}_{\mathrm{N}}=\dot{E}_{\mathrm{M}}-\dot{I}(Z_{\mathrm{M}}+Z_{\mathrm{L}})=\dot{E}_{\mathrm{N}}+\dot{I}Z_{\mathrm{N}} \tag{3-84}$$

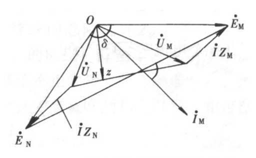
此时输电线路上的压降为

$$\dot{U}_{\mathrm{MN}}=\dot{U}_{\mathrm{M}}-\dot{U}_{\mathrm{N}}=\dot{I}Z_{\mathrm{L}} \tag{3-85}$$

(a) 一次系统图



(b) 系统阻抗角与线路阻抗角相等时的矢量图



(c) 阻抗角不等时的矢量图

图 3.28　系统振荡时的分析图

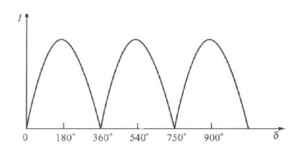
当全系统的阻抗角相等时，按照上述关系式可画出矢量图如图 3.28（b）所示。以$\dot{E}_M$为实轴，$\dot{E}_N$落后于$\dot{E}_M$的角度为δ。连接$\dot{E}_M$和$\dot{E}_N$矢量端点得到电动势差$\dot{E}_M-\dot{E}_N$。电流$\dot{I}_M$滞后于此电动势得角度为φ_z。从$\dot{E}_M$上减去Z_M上的压降$\dot{I}_M Z_M$后得到 M 点电压$\dot{U}_M$。$\dot{E}_N$加上Z_N上的压降$\dot{I}_M Z_N$得到 N 点的电压$\dot{U}_N$。由于系统阻抗角等于线路阻抗角，也等于总阻抗的阻抗角，故$\dot{U}_M$和$\dot{U}_N$的端点必然落在直线（$\dot{E}_M-\dot{E}_N$）上。矢量（$\dot{U}_M-\dot{U}_N$）代表输电线路上的电压降落。如果输电线路是均匀的，则输电线上各点电压矢量的端点沿着直线（$\dot{U}_M-\dot{U}_N$）移动。从原点与此直线上任一点连线所作成的矢量即代表输电线路上该点的电压。从原点作直线（$\dot{U}_M-\dot{U}_N$）的垂线所得到的矢量最短，垂足 z 所代表的输电线路上那一点在振荡角度δ下的电压最低，该点称为系统在振荡角度为δ时的电气中心或振荡中心。此时电气中心不随δ的改变而移动，始终位于系统纵向总阻抗$Z_M+Z_N+Z_L$之中点，电气中心的名称由此而来。

当$\delta=180^0$时，振荡中心得电压将降至零。从电压、电流得数值看，这和在此点发生三相短路无异，但系统振荡属于不正常运行状态而非故障，继电保护装置不应该切除振荡中心所在的线路。因此，继电保护装置必须具备区别三相短路和系统振荡的能力，才能确保系统振荡时的正确工作。

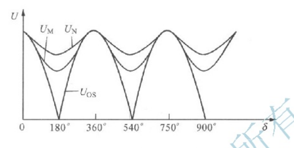
图 3.28（c）为系统阻抗角与线路阻抗角不等时的情况。在此情况下，电压矢量$\dot{U}_M$和$\dot{U}_N$的端点不会落在直线（$\dot{E}_M-\dot{E}_N$）上。如果线路阻抗是均匀的，则线路上任一点的电压矢量的端点将落在代表线路电压降落的直线（$\dot{U}_M-\dot{U}_N$）上。从原点作直线（$\dot{U}_M-\dot{U}_N$）的垂线即可得到振荡中心的位置及振荡中心的电压。不难看出，在此情况下振荡中心的位置将随δ的变化而变化。

图 3.29(b)为 M、N 和 Z 点电压幅值随δ变化的典型曲线。

对于系统各部分阻抗角不同的一般情况，也可用类似的图解法进行分析，此处从略。



（a）电流变化曲线



（b）电压变化曲线

图 3.29　系统振荡时，电流、电压的变化曲线

3. 系统振荡对距离保护的影响

当系统振荡时，振荡电流为

$$\dot{I}=\frac{\dot{E}_M-\dot{E}_N}{Z_M+Z_L+Z_N}=\frac{\dot{E}_M-\dot{E}_N}{Z_\Sigma} \tag{3-86}$$

M 点的母线电压为

$$\dot{U}_M=\dot{E}_M-\dot{I}Z_M \tag{3-87}$$

因此，安装于 M 点阻抗继电器的测量阻抗为

$$Z_{K.M}=\frac{\dot{U}_M}{\dot{I}}=\frac{\dot{E}_M}{\dot{I}}-Z_M=\frac{\dot{E}_M}{\dot{E}_M-\dot{E}_N}Z_\Sigma-Z_M$$

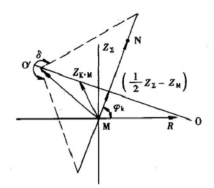
$$=\frac{1}{1-e^{-j\delta}}Z_\Sigma-Z_M \tag{3-88}$$

因$1-e^{-j\delta}=1-\cos\delta+j\sin\delta=\dfrac{2}{1-j\cot\dfrac{\delta}{2}}$，所以

$$Z_{K.M}=(\frac{1}{2}Z_\Sigma-Z_M)-j\frac{1}{2}Z_\Sigma\cot\frac{\delta}{2}=(\frac{1}{2}-\rho_m)Z_\Sigma-j\frac{1}{2}Z_\Sigma\cot\frac{\delta}{2} \tag{3-89}$$

式中　$\rho_m=\dfrac{Z_M}{Z_\Sigma}$

将此继电器测量阻抗随δ变化的关系画在以保护安装处 M 为原点的复平面上，当系统所有阻抗角相同时，$Z_{K.M}$将在Z_Σ的垂直平分线$\overline{oo'}$上移动，如图 3.30 所示。



3.30 系统振荡时测量阻抗的变化

为了便于分析说明，现将部分表达式计算结果如表 3-2 所示。

表 3-2　$j\frac{1}{2}Z_\Sigma\cot\frac{\delta}{2}$ 的计算结果

δ	$\cot\frac{\delta}{2}$	$j\frac{1}{2}Z_\Sigma\cot\frac{\delta}{2}$
0^0	∞	$j\infty$
90^0	1	$j\frac{1}{2}Z_\Sigma$
180^0	0	0
270^0	-1	$-j\frac{1}{2}Z_\Sigma$
360^0	$-\infty$	$-j\infty$

由此可见，当 $\delta=0^0$ 时，$Z_{K.M}=\infty$；当 $\delta=180^0$ 时，$Z_{K.M}=(\frac{1}{2}Z_\Sigma-Z_M)$，即等于保护安装处到振荡中心之间的阻抗。这一分析结果表明，当 δ 改变时，不仅测量阻抗的数值在变，而且阻抗角也在变，其范围在 (φ_k-90^0) 到 (φ_k+90^0) 之间。

在系统振荡时，为了算出不同安装处距离保护测量阻抗的变化规律，在式（3-89）中可令 Z_X 代替 Z_M，并假定 $m=\frac{Z_X}{Z_\Sigma}$，m 为小于 1 的变数，则式（3-89）就可变为

$$Z_{K.M}=(\frac{1}{2}-m)Z_\Sigma-j\frac{1}{2}Z_\Sigma\cot\frac{\delta}{2} \tag{3-90}$$

当 m 取不同值时，测量阻抗变化的轨迹是一直线簇，如图 3.31 所示，当 m＝$\frac{1}{2}$ 时，特性直线通过坐标原点，相当于保护装置安装在振荡中心处；当 m<$\frac{1}{2}$ 时，直线簇与 $+jX$ 轴相交，相当于图 3.30 所分析的情况，此时振荡中心位于保护范围的正方向,；而当 m>$\frac{1}{2}$ 时，直线簇则与 $-jX$ 相交，振荡中心位于保护范围的反方向。

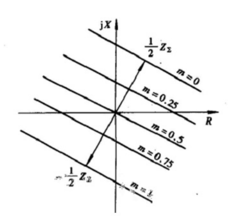


图 3.31 系统振荡时不同点测量阻抗的变化

当两侧系统的电势不等时，继电器测量阻抗的变化将具有更复杂的形式。设 $h=\dfrac{E_{\rm M}}{E_{\rm N}}$，当 h>1 及 h<1 时，测量阻抗末端的轨迹如图 3.32 中的圆弧 1 和圆弧 2 所示。

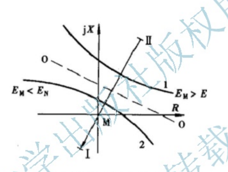


图 3.32　测量阻抗的变化轨迹

在这种情况下，当 $\delta=0^0$ 时，由于两侧电势不等而产生一个环流，因此，测量阻抗不等于∞，而是一个位于圆周上的有限数值。

引用上述结论可分析系统振荡时距离保护所受到的影响。现仍以变电所 M 处的距离保护为例，其距离 I 段起动阻抗整定为 0.85 $Z_{\rm L}$，在图 3.33 中，以长度 MA 表示，由此可以作出各种继电器

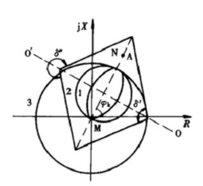


图 3.33　系统振荡时 M 变电站测量阻抗的变化图

的动作特性曲线，其中曲线 1 为方向透镜型继电器特性，曲线 2 为方向阻抗继电器特性，曲线 3 为全阻抗继电器特性。当系统振荡时，测量阻抗的变化如图 3.30 所示，找出各种动作特性与直线 $\overline{oo'}$ 的交点 o' 和 o''，其所对应的角度为 δ' 和 δ''，则在这两个交点的范围内继电器的测量阻抗均位于动作特性圆内，因此，继电器就要起动，即在这段范围内，距离保护受振荡的影响可能误动。由图中可见，在同

样整定值的条件下，全阻抗继电器受振荡的影响最大，而透镜型继电器所受的影响最小。一般而言，继电器的动作特性在阻抗复平面上沿$\overline{oo'}$方向所占的面积愈大，受振荡的影响就愈大。

总之，电力系统振荡时，阻抗继电器是否误动、误动的时间长短与保护安装处位置、保护动作范围、动作特性的形状和振荡周期的长短等有关。安装位置距振荡中心愈近、整定值愈大、动作特性曲线在与整定阻抗垂直方向的动作区愈大时，愈容易受振荡的影响，振荡周期愈长，误动的几率愈高。并不是安装在系统中所有的阻抗继电器在振荡时都会误动，但是在出厂时都要求阻抗继电器配备振荡闭锁，使之具有通用性。

3.4.5 距离保护的振荡闭锁

既然电力系统振荡时可能引起距离保护的误动作，就需要进一步分析比较电力系统振荡与短路时电气量的变化特征，找出其间的差异，用以构成振荡闭锁元件，实现振荡时闭锁距离保护。

1. 振荡与短路时电气量的差异

（1） 振荡时，三相完全对称，无负序和零序分量出现；短路时总要长时间（不对称短路过程中）或瞬间（三相短路初始时）出现负序分量或零序分量。

（2） 振荡时，振荡电流和系统中各点的电压随δ的变化呈现周期性变化，其变化速度（$\frac{dU}{dt}$、$\frac{dI}{dt}$、$\frac{dZ}{dt}$）与系统功角的变化速度一致，比较慢。当两侧功角摆开至180^{0}时，相当于在振荡中心发生三相短路（此时I最大，其值为$\frac{2E}{|Z_\Sigma|}$，大大超过负荷电流 ）。从短路前到短路后其值突然变化，速度很快，而短路后短路电流、各点的残余电压和测量阻抗在不计衰减时是不变的。

3）振荡时，电气量呈周期性的变化，若阻抗测量元件误动作，则在一个振荡周期内动作和返回各一次；而短路时阻抗测量元件可能动作（区内短路），可能不动作（区外短路）。

2. 构成振荡闭锁回路的基本要求

（1）系统发生振荡而没有故障时，应可靠的将保护闭锁，且振荡不停息，闭锁不应解除；

（2）系统发生各种类型的故障（包括转换性故障）时，不论系统有无振荡，保护都不应闭锁而可靠动作；

（3）在振荡的过程中发生不对称故障时，保护应能快速的正确动作。对于对称故障，则允许保护延时动作；

（4）当保护范围以外发生故障引起系统振荡时，应可靠闭锁；

（5）先故障而后又发生振荡时，保护不致无选择性的动作；

（6）振荡平息后，振荡闭锁装置应能自动返回，准备好下一次的动作。

3. 振荡闭锁的措施

构成振荡闭锁的原理有多种，但在实际中，常用以下方法。

1）利用是否出现负序、零序分量实现闭锁

为了提高保护动作的可靠性，在系统无故障时，一般距离保护一直处于闭锁状态。当系统发生故障时，短时开放距离保护，允许保护出口跳闸，这称为短时开发。若在开放的时间内，阻抗继电器动作，说明故障点位于阻抗继电器的动作范围内，将故障切除；若在开放时间内，阻抗继电器未动作，则说明故障不在保护区内，重新将保护闭锁。原理图如图 3.34 所示。

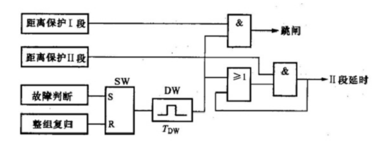


图 3.34 利用故障时短时开放的方式实现振荡闭锁

图中故障判断元件是实现振荡闭锁的关键元件。故障判断元件和整组复归元件在系统正常运行或因静态稳定被破坏时都不会动作，这时双稳态触发器 SW 以及单稳态触发器 DW 都不会动作，保护装置的Ⅰ段和Ⅱ段被闭锁，无论阻抗继电器本身是否动作，保护都不可能动作，即不会误动。电力系统发生故障时，故障判断元件立即动作，动作信号经双稳态触发器 SW 记忆，直到整组复归。SW 输出的信号又经单稳态触发器 DW，固定输出时间宽度为 T_{DW} 的脉冲，在 T_{DW} 时间内，若阻抗判断元件的Ⅰ段或Ⅱ段动作，则允许保护无延时或有延时动作（距离保护Ⅱ段被自动保持）。若在 T_{DW} 时间内，阻抗判断元件的Ⅰ段或Ⅱ段没有动作，保护闭锁直至满足整组复归条件，准备下次开放保护。

T_{DW} 称为振荡闭锁开放时间或允许动作时间，其选择需要兼顾两个原则：一是要保证在正向区内故障时，保护Ⅰ段有足够的时间可靠跳闸，保护Ⅱ段的测量元件能够可靠起动并实现自保持，因而时间不能过短，一般不应小于 0.1s；二是要保证在区外故障引起振荡时，测量阻抗不会在故障后的 T_{DW} 时间内进入动作区，因而时间又不能过长，一般不应大于 0.3s。所以，通常情况下取 $T_{DW}=0.1\sim0.3s$，现代数字保护中，开放时间一般取 0.15s 左右。

整组复归元件在故障或振荡消失后再经过一个延时动作，将 SW 复归，它与故障判断元件、SW 配合，保证在整个一次故障过程中，保护只开放一次。但是对于先振荡后故障的情况时，保护将被闭锁，尚需要有再故障判别元件。

故障判断元件又称为起动元件，其作用是仅判断系统是否发生故障，而不需要判断出故障的远近及方向，对它的要求是灵敏度高、动作速度快，系统振荡时不误动。目前距离保护中应用的故障判断元件主要有反映电压、电流中负序分量或零序分量的判断元件和反应电流突变量的判断元件两种。

（1）反映电压、电流中负序分量或零序分量的故障判断元件。

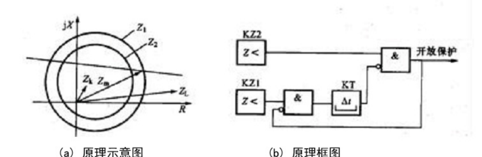
电力系统正常运行或因静稳定破坏而引发振荡时，系统均处于三相对称状态，电压、电流中不存在负序分量或零序分量。而当发生不对称短路时，故障电压、电流中都会出现较大的负序分量或零序分量；三相对称短路时，一般由不对称短路发展而来，短时也会有负序、零序分量输出。利用负序分量或零序分量是否存在，作为系统是否发生短路的判断。

（2）反映电流突变量的故障判断元件。

反应电流突变量的故障判断元件是根据在系统正常或振荡时电流变化比较缓慢，而在系统故障时电流会出现突变这一特点来进行判断故障的。电流突变的检测，既可用模拟的方法实现，也可用数字的方法实现。

2）利用阻抗变化率的不同实现闭锁

系统短路时，测量阻抗由负荷阻抗突变为短路阻抗，而在振荡时，测量阻抗缓慢变为保护安装处到振荡中心点的线路阻抗，这样，根据测量阻抗的变化速度的不同就可构成振荡闭锁。其原理可用图 3.35 说明。



(a) 原理示意图　　　　　　　　　(b) 原理框图

图 3.35 利用电气量变化速度的不同构成振荡闭锁

图中 KZ1 为整定值较高的阻抗元件，KZ2 为整定值较低的阻抗元件。实质是在 KZ1 动作后先　开放一个 Δt 的延时，如果在这段时间内 KZ2 动作，去开放保护，直到 KZ2 返回；如果在 Δt 的时间内 KZ2 不动作，保护就不会被开放。它利用短路时阻抗的变化率较大，KZ1、KZ2 的动作时间差小于 Δt，短时开放。但与前面短时开放不同的是，测量阻抗每次进入 KZ1 的动作区后，都会开放一定时间，而不是在整个故障过程中只开放一次。

由于对测量阻抗变化率的判断是由两个大小不同的圆完成，所以这种振荡闭锁原理通常也称“大圆套小圆”振荡闭锁原理。

3） 利用动作延时实现闭锁

系统振荡时，距离保护的测量阻抗是随 δ 角的变化而变化的，当 δ 变化到某一值时，测量阻抗进入到阻抗继电器的动作区，而当 δ 角继续变化到另一角度时，测量阻抗又从动作区移出，测量元件返回。

分析表明，对于按躲过最大负荷整定的距离保护Ⅲ段阻抗元件，测量阻抗落入其动作区的时间小于一个振荡周期（1～1.5s），只有距离保护Ⅲ段动作延时大于 1～1.5s，系统振荡时，保护Ⅲ段才不会误动作。

由北京四方继保公司生产的 750kV 微机型线路保护装置如图 3.36 所示。



图 3.36　微机型线路保护屏

3.5 距离保护的整定计算

3.5.1 距离保护的整定原则

保护装置类型的选择是根据可能出现故障的情况来确定。目前运行中的距离保护一般都采用三段式，主要由起动元件、阻抗元件、振荡闭锁元件、瞬时测量元件、时间元件和逻辑元件等部分组成。为了对不同特性的阻抗保护进行整定，保证电力系统的安全运行，在整定计算时需要注意以下问题：

（1）各种保护在动作时限上按阶梯原则配合；

（2）相邻元件的保护之间、主保护与后备保护之间、后备保护与后备保护之间均应配合；

（3）相间保护与相间保护之间、接地保护与接地之间的配合，反应不同类型故障的保护之间不能配合；

（4）上一线路与下一线路所有相邻线路保护间均需相互配合；

（5）不同特性的阻抗继电器在使用中还需考虑整定配合；

（6）对于接地距离保护，只有在整定配合要求不很严格的情况下，才能按照相间距离保护的整定计算原则进行整定；

（7）了解所选保护采用的接线方式、反应的故障类型、阻抗继电器的特性及采用的段数等；

（8）给出必须的整定值项目及注意事项。

3.5.2 距离保护的整定计算

1. 距离保护Ⅰ段整定计算

（1）当被保护线路无中间分支线路（或分支变压器）时，定值计算按躲过本线路末端故障整定，一般可按被保护正序阻抗的 80%～85%计算，即

$$Z_{\text{rel}} = K_{\text{rel}} Z_1 \tag{3-91}$$

对方向阻抗继电器则有 $\theta_{\text{sen}} = \theta_1$

式中 $Z_{\text{set.I}}$ ——距离保护Ⅰ段整定值；

Z_1 ——被保护线路的正序阻抗；

K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

θ_{sen} ——继电器的最大灵敏角；

θ_1 ——被保护线路的阻抗角。

保护的动作时间按 t_1=0s，即保护固有动作时间整定。

（2）当线路末端仅为一台变压器时（即线路变压器组），其定值计算按不伸出线路末端变压器内部整定，即按躲过变压器其他各侧的母线故障整定，即

$$Z_{\text{set.I}} = K_{\text{rel}} Z_1 + K'_{\text{rel}} Z_{\text{T}} \tag{3-92}$$

式中 K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

Z_1 ——线路正序阻抗；

$K_{rel}^{'}$ ——可靠系数，一般取 0.75；

Z_T ——线路末端变压器的阻抗。

保护动作时间按 t_I=0s，即保护固有动作时间整定。

（3）当线路终端变电所为两台及以上变压器并列运行且变压器均装设差动保护时，如果本线路上装设有高频保护时，距离 I 段仍可按 1）项的方式计算。当本线路上未装设高频保护时，则可按躲过本线路末端故障或按躲开终端变电所其他母线故障整定，即

$$Z_{set.I} = K_{rel} Z_1 \tag{3-93}$$

或 $$Z_{set.I} = K_{rel} Z_1 + K_{rel}^{'} Z_T^{'}$$

式中 K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

Z_1 ——线路正序阻抗；

$K_{rel}^{'}$-----可靠系数，一般取 0.75；

$Z_T^{'}$ ——终端变电所变压器并联阻抗。

（4）当线路终端变电所为两台及以上变压器并联运行（变压器未装设差动保护）时，按躲过本线路末端故障，或按躲过变压器的电流速断保护范围末端故障整定，即

$$Z_{set.I} = K_{rel} Z_1 + K_{rel}^{'} Z^{"} \tag{3-94}$$

式中 $Z^{"}$ ——终端变电所变压器并列运行时，电流速断保护范围的最小阻抗值；

其他符号同前。

（5）当被保护线路中间接有分支线路或分支变压器时，按躲开本线路末端和躲开分支线路（分支变压器）末端故障整定，即

$$Z_{set.I} = K_{rel} Z_1$$

或 $$Z_{set.I} = K_{rel} Z_{x1}^{'} + K_{rel}^{'} Z_T \tag{3-95}$$

式中 $Z_{x1}^{'}$ ——本线中间接分支线路（分支变压器）处至保护安装处之间的线路正序阻抗。

2. 离保护 II 段整定计算

1）按与相邻线路距离保护 I 断配合整定

$$Z_{set.II} = K_{rel} Z_1 + K_{rel}^{'} K_b Z_{set.I}^{'} \tag{3-96}$$

式中 Z_1 ——被保护线路正序阻抗；

$Z_{set.I}^{'}$ ——相邻距离保护 I 段动作阻抗；

K_b ——（助增）分支系数，选取可能的最小值；

K_b ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

K'_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8。

保护动作时间 $t_{II} \geq \Delta t$

式中　Δt ——时间级差，一般取 0.5s.

最大灵敏角　$\theta_{sen} = \theta_1$

式中　θ_1 ——线路正序阻抗角。

2）躲过相邻变压器其他侧母线故障整定

$$Z_{set.II} = K_{rel} Z_1 + K'_{rel} K_b Z'_T \tag{3-97}$$

式中　Z_1 ——本线路正序阻抗；

Z'_T ——相邻变压器阻抗（若多台变压器并列运行时，按并联阻抗计算）；

K_b ——（助增）分支系数，选取可能的最小值；

K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

K'_{rel} ——可靠系数，一般取 0.7～0.75。

保护动作时间及最大灵敏角的整定同上。

3）按与相邻线路距离保护 II 段配合整定

$$Z_{set.II} = K_{rel} Z_1 + K'_{rel} K_b Z'_{set.II} \tag{3-98}$$

式中　$Z'_{set.II}$ ——相邻距离保护 II 段整定阻抗；

Z_1 ——被保护线路的正序阻抗；

K_b ——（助增）分支系数，选取可能的最小值；

K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

K'_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8;

最大灵敏角　$\theta_{sen} = \theta_1$

式中　θ_1 ——线路正序阻抗角。

保护动作时间　$t_{II} \geq t_{II} + \Delta t$

式中 $t_{\mathrm{II}}^{'}$ ——相邻距离保护Ⅱ段动作时间。

4）按保证被保护线路末端故障保护有足够的灵敏度整定

当按 1)、2)、3)各项条件所计算的动作阻抗在本线路末端故障时，保护的灵敏度很高，与此同时又出现保护的Ⅰ段与Ⅱ段之间的动作阻抗相差很大，使继电器的整定范围受到限制而无法满足Ⅰ段、Ⅱ段计算定值的要求时，则可改为按保证本线路末端故障时有足够的灵敏度条件整定，即

$$Z_{\mathrm{set.II}} = K_{\mathrm{sen}} Z_1 \tag{3-99}$$

式中 Z_1 ——被保护线路正序阻抗；

K_{sen} ——被保护线路末端故障保护的灵敏度。

对最小灵敏度的要求为：

当线路长度为 50km 以下时，不小于 1.5；

当线路长度为 50~200km 时，不小于 1.4；

当线路长度为 200km 以上时，不小于 1.3；

同时应满足短路时有 10Ω弧光电阻保护能可靠动作。

5）当相邻线路末端装设有其他类型的保护时

（1） 当相邻线路装设有相间电流保护时

距离保护Ⅱ段定值为

$$Z_{\mathrm{set.II}} = K_{\mathrm{rel}} Z_1 + K_{\mathrm{rel}}^{'} K_{\mathrm{b}} Z_1^{'} \tag{3-100}$$

式中 Z_1 ——被保护线路的正序阻抗；

K_{b} ——（助增）分支系数，选取可能的最小值；

K_{rel} ——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

$K_{\mathrm{rel}}^{'}$ ——可靠系数，一般取 0.75；

$Z_1^{'}$ ——相邻线路电流保护最小保护范围（以阻抗表示）。

$Z_1^{'}$ 的计算为 $$Z_1^{'} = \frac{\sqrt{3}E_{\mathrm{s.min}}}{2I_{\mathrm{set}}^{'}} - Z_{\mathrm{s.max}} \tag{3-101}$$

式中 $E_{\mathrm{s.min}}$ ——系统最小运行方式相电势；

$Z_{\mathrm{s.max}}$ ——系统至相邻线路保护安装处之间的最大阻抗（最小运行方式下的阻抗值）。

保护动作时间为 $t_{\mathrm{II}} \geq t^{'} + \Delta t$

式中 $t^{'}$ ——相邻电流保护的动作时间；

Δt ——时间级差。

（2） 当相邻线路装设有电压保护时，保护整定为

$$Z_{\text{set.II}} = K_{\text{rel}} Z_1 + K'_{\text{rel}} K_{\text{b}} Z''_1 \tag{3-102}$$

式中 Z''_1 ——相邻线路电压保护之最小保护范围（以阻抗表示），其计算为

$$Z''_1 = \frac{U'_{\text{set}}}{\sqrt{3}E_{\text{s}} - U'_{\text{set}}} \times Z_{\text{s.min}} \tag{3-103}$$

式中　U'_{set} ——电压保护的整定电压（线电压值）；

E_{s} ——系统运行相电势；

$Z_{\text{s.min}}$ ——系统至相邻线路电压保护安装处之间的最小阻抗（最大运行方式下）；

其余符号含义同（1）项。

保护动作时间为　　$t_{\text{II}} \geq t' + \Delta t$

式中　t' ——相邻电压保护的动作时间.

（3）　当相邻线路装设电流、电压保护时

距离保护 II 段的动作阻抗可分别按（1）、（2）项计算出电流、电压保护的电流元件和电压元件的保护范围 Z''_1，再按式（3-100）计算出距离保护 II 段的动作阻抗值。

保护动作时间为　　$t_{\text{II}} \geq t' + \Delta t$

式中　t' ——相邻电流、电压保护的动作时间；

Δt ——时间级差。

6）距离保护 II 段灵敏度

II 段保护灵敏度的计算为

$$K_{\text{sen}} = \frac{Z_{\text{set.II}}}{Z_1} \tag{3-104}$$

式中 $Z_{\text{set.II}}$ ——距离保护 II 段整定阻抗值；

Z_1 ——被保护线路的正序阻抗。

3. 距离保护 III 段整定计算

1）按与相邻距离保护 II 段配合整定

此时，保护的整定值为

$$Z_{\text{set.III}} = K_{\text{rel}} Z_1 + K'_{\text{rel}} K_{\text{b}} Z'_{\text{set.II}} \tag{3-105}$$

式中 $Z'_{\text{set.II}}$ ——相邻线路距离保护 II 段整定阻抗；

K_{b} ——（助增）分支系数，选取可能的最小值；

K_{rel}——可靠系数，一般取 0.8～0.85；

$K_{\mathrm{rel}}^{'}$——可靠系数，一般取 0.8。

最大灵敏角　$\theta_{\mathrm{sen}}=\theta_{1}$

式中　θ_{1}——线路正序阻抗角。

距离保护III段动作时间按以下条件分别整定：

(1) 相邻距离保护 II 段在重合闸之后不经振荡闭锁控制，且距离III段保护范围不伸出相邻变压器的其他母线时，

$$t_{\mathrm{III}}\geq t_{\mathrm{II.Z}}^{'}+\Delta t \tag{3-106}$$

式中 $t_{\mathrm{II.Z}}^{'}$——相邻距离 II 在重合闸之后不经经振荡闭锁控制时的 II 段动作时间；

(2) 当III段保护范围伸出相邻变压器的其他母线时，其动作时间整定为

$$t_{\mathrm{III}}\geq t_{\mathrm{T}}^{'}+\Delta t \tag{3-107}$$

式中 $t_{\mathrm{T}}^{'}$——相邻变压器的后备保护动作时间。

2）按与相邻距离III段相配合

距离III段按与相邻距离III段相配合时，动作阻抗为

$$Z_{\mathrm{set.III}}=K_{\mathrm{rel}}Z_{1}+K_{\mathrm{rel}}^{'}K_{\mathrm{b}}Z_{\mathrm{set.III}}^{'} \tag{3-108}$$

式中 $Z_{\mathrm{set.III}}^{'}$——相邻距离III段的动作阻抗；

Z_{1}——线路的正序阻抗；

K_{rel}——可靠系数，取 0.8～0.85；

$K_{\mathrm{rel}}^{'}$——可靠系数，取 0.8；

K_{b}——分支系数，取可能的最小值。

最大灵敏角　$\theta_{\mathrm{sen}}=\theta_{1}$

式中　θ_{1}——线路正序阻抗角。

距离III段动作时间为　$t_{\mathrm{III}}\geq t_{\mathrm{III}}^{'}+\Delta t$ (3-109)

式中 $t_{\mathrm{III}}^{'}$——相邻距离保护III段动作时间。

4） 按与相邻变压器的电流、电压保护配合整定其定值为

$$Z_{\mathrm{set.III}}=K_{\mathrm{rel}}Z_{1}+K_{\mathrm{rel}}^{'}K_{\mathrm{b}}Z^{'} \tag{3-110}$$

式中　$Z^{'}$——电流元件或电压元件的最小保护范围阻抗值。

该保护范围按以下各条件分别进行计算：

对相邻保护为电压元件时， $Z' = \dfrac{U'_{set}}{\sqrt{3}E_s - U'_{set}} * Z_{s.min}$ （3-111）

式中 U'_{set} ——相邻电压元件动作电压（线电压）；

E_s ——系统运行相电势；

$Z_{s.min}$ ——系统至相邻电流保护安装处之间的最小综合阻抗（最大运行方式下）。

相邻保护为电流元件时，计算为

$$Z' = \frac{\sqrt{3}E_s}{2I'_{set}} - Z_{s.max} \tag{3-112}$$

式中 I'_{set} ——相邻电流元件动作电流；

$Z_{s.max}$ ——系统至相邻电流保护安装处之间的最大等值阻抗（最小运行方式下）。

最大灵敏角 $\theta_{sen} = \theta_1$

式中 θ_1 ——线路正序阻抗角。

保护III段时间为

$$t_{III} \geq t'_T + \Delta t \tag{3-113}$$

式中 t'_T ——相邻变压器电流、电压保护动作时间。

4）按躲过线路最大负荷时的负荷阻抗配合整定

(1) 当距离III段为电流起动元件时，其整定值为

$$I_{set.III} = \frac{K'_{rel}K_{ss}}{K_{re}} I_{L.max} \tag{3-114}$$

式中 K'_{rel} ——可靠系数，取 1.2～1.25;

K_{re} ——电流返回系数，取 0.85;

K_{ss} ——自起动系数，根据负荷性质可取 1.5～2.5;

$I_{L.max}$ ——线路最大负荷电流。

(2) 当III距离段为全阻抗起动元件时，其整定值为

$$Z_{set.III} = \frac{Z_{L.min}}{K'_{rel}K_{ss}K_{re}} \tag{3-115}$$

式中 K'_{rel} ——可靠系数，取 1.2～1.25；

K_{re} ——电流返回系数，取 1.15～1.25；

K_{ss} ——自起动系数，根据负荷性质可取 1.5～2.5；

$Z_{L.min}$ ——最小负荷阻抗值。

最小负荷阻抗值计算为 $$Z_{L.min}=\frac{(0.9\sim 0.95)U_N}{\sqrt{3}I_{L.max}} \tag{3-116}$$

式中 U_N ——额定运行线电压。

(3) 当为方向阻抗起动元件时，其整定值为

当方向阻抗元件为 0^0 接线方式时，III段整定值为

$$Z_{set.III}=\frac{Z_{L.min}}{K_{rel}K_{re}K_{ss}\cos(\varphi_L-\varphi_l)} \tag{3-117}$$

当方向阻抗元件为 -30^0 接线方式时，III段整定值为

$$Z_{set.III}=\frac{Z_{L.min}}{K_{rel}K_{re}K_{ss}\cos(\varphi_L-\varphi_l-30^0)} \tag{3-118}$$

式中 φ_l ——线路正序阻抗角，一般为 60^0~85^0；

φ_L ——负荷阻抗角，一般小于 25^0，即功率因数不低于 0.9；

5）距离III段的灵敏度

线路末端灵敏度计算为 $$K_{sen}=\frac{Z_{set.III}}{Z_1} \tag{3-119}$$

后备保护灵敏度计算为 $$K_{sen}=\frac{Z_{set.III}}{Z_1+K_bZ'_1} \tag{3-120}$$

式中 Z_1 ——线路正序阻抗；

$Z_{set.III}$ ——距离III段整定阻抗。

距离III段灵敏度的要求：

对于 110kV 线路，在考虑相邻线路相继动作后，对相邻元件后备保护灵敏度要求 K_{sen} ≥1.2；

对于 220kV 及以上线路，对相邻元件后备保护灵敏度要求 K_{sen} ≥1.3；若后备保护灵敏度不够时，根据电力系统的运行要求，可考虑装设近后备保护；对于相邻元件为 Y/Δ 接线的变压器，当变压器低

压侧发生两相短路时，按 $\frac{U_{\Delta}}{I_{\Delta}}$ 接线的阻抗继电器，其反应短路故障的能力很差，一般起不到足够的后备作用。

4. 距离保护各段动作时限的选择配合原则

1）距离保护Ⅰ段的动作时限

距离保护Ⅰ段的动作时限，即保护装置本身的固有动作时间，一般不大于 0.03～0.1s，不作特殊的计算。

2） 距离保护Ⅱ段的动作时限

距离保护Ⅱ段的动作时限应按阶梯式特性逐段配合。当距离保护Ⅱ段与相邻线路距离保护段Ⅰ配合时，若距离Ⅰ段动作时限（本身固有动作时间）为 0.1s 以下时，Ⅱ段动作时限可按 0.5s 考虑；当相邻距离保护Ⅰ段动作时限为 0.1s 以上时，或者与相邻变压器差动保护配合时，则距离保护Ⅱ段动作时限可选为 0.5～0.6s。当距离保护Ⅱ段与相邻距离保护Ⅱ段配合时，按 $t_{\text{II}} = t_{\text{II}}' + \Delta t$ 计算，其中 t_{II}' 为相邻距离保护Ⅱ段的时限。当相邻母线上有失灵保护时，距离Ⅱ段的动作时限尚应与失灵保护相配合，但为了降低主保护的动作时限，此情况的配合级差允许按 Δt ＝0.2～0.25s 考虑。

3) 距离保护Ⅲ段的动作时限

距离保护Ⅲ段的动作时限仍应遵循阶梯式原则，但应注意：

（1） 躲过系统振荡周期。

距离保护Ⅲ段动作时限不得低于常见的系统振荡周期（因距离保护 III 段一般不经振荡闭锁控制）。系统常见的振荡周期为 1～1.5s，故距离保护Ⅲ段动作时限应大于或等于 2s。另外，当相邻距离保护Ⅱ段经振荡闭锁控制时，为了在重合闸后距离保护能与相邻的距离保护相配合，可将距离保护Ⅲ段经重合闸后延时加速到 1.5s，这样既可满足躲过振荡的要求，又能满足与相邻距离保护Ⅲ段相配合的效果（因相邻距离保护Ⅲ段仍为大于或等于 2s 的动作时间）。

（2） 在环网中距离保护动作时限的配合。

在环网中，距离保护Ⅲ段的动作时限，仍应按阶梯式特性逐级配合，但若所有Ⅲ段均按与相邻Ⅲ段配合，则势必出现相互循环配合的结果。为了解决这一问题，必须选取某一线路的距离保护Ⅲ段与相邻的距离保护Ⅱ段动作时限配合。此即环网中距离保护Ⅲ段动作时限的起始配合点，此起始点的选择原则是：应尽可能使整个环网距离保护Ⅲ段的保护灵敏度较高，动作时限较短。通常按以下几方面考虑：

① 若相邻线路比本线路长 ，则本线路距离保护Ⅲ段可考虑按与相邻相邻距离保护Ⅱ段动作时间配合。

② 本线路与相邻线路之间有较大的助增系数，且受运行方式变化的影响较小时，可按本线路距离保护Ⅲ段与相邻距离保护Ⅱ段动作时限配合。

③当相邻线路距离保护Ⅱ段动作时限较短，而相邻线路的距离保护Ⅲ段的动作时限又较长时，可考虑本线路距离保护Ⅲ段与相邻距离保护Ⅱ段动作时限相配合。

3.5.3 整定计算举例

［例 3.1］ 图 3.37 所示网络中，各线路均装设有距离保护，已知线路 AB 的最大负荷电流为 $I_{\text{L.max}} = 350\text{A}$，功率因数 $\cos\varphi = 0.9$，各线路正序阻抗为 $Z_1 = 0.4\Omega/\text{km}$，阻抗角 $\varphi_{\text{L}} = 70^0$，电动机的自起动系数 $K_{\text{ss}} = 1.5$，正常时母线最低工作电压 $U_{\min} = 0.9U_{\text{N}}$ ，其余参数如图 3.37 中所示，请对保护 1 的相间短路保护Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ段进行整定。

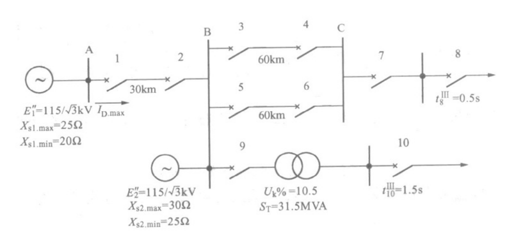


图 3.37 例 3.1 网络图

解：1．有关元件阻抗计算

线路 1-2 的正序阻抗　Z_{1-2} =0.4×30=12 Ω

线路 3-4、5-6 的正序阻抗分别为 $Z_{3-4}=Z_{5-6}=0.4\times 60=24\ \Omega$

变压器的等值阻抗 $Z_{\mathrm{T}}=\dfrac{U_{\mathrm{k}}\%}{100}\times\dfrac{U_{\mathrm{T}}^2}{S_{\mathrm{T}}}=\dfrac{10.5}{100}\times\dfrac{115^2}{31.5}=44.1\ \Omega$

2．距离Ⅰ段的整定计算

1）整定阻抗

$$Z_{\mathrm{set}}^{\mathrm{I}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{I}}Z_{1-2}=0.85\times 12=10.2\ \Omega$$

2）动作时限

$t^{\mathrm{I}}=0\mathrm{s}$，实际Ⅰ段动作时限为保护固有动作时间。

3．距离Ⅱ段的整定计算

1）整定阻抗：按下列两个条件选择。

（1）与相邻下级最短线路 3-4 （或 5-6）的保护Ⅰ段配合，即

$$Z_{\mathrm{set}}^{\mathrm{II}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}(Z_{1\text{-}2}+K_{\mathrm{b.min}}Z_{\mathrm{set.3}}^{\mathrm{I}})$$

式中取 $K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{I}}$=0.85，$K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}$=0.8，而 $Z_{\mathrm{set.3}}^{\mathrm{I}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{I}}Z_{3-4}=0.85\times 24=20.4\ \Omega$

$K_{\mathrm{b.min}}$ 的计算如下：

$K_{\mathrm{b.min}}$ 为保护 3 的Ⅰ段末端发生短路时对保护 1 而言的最小分支系数，如图 3.38 所示，

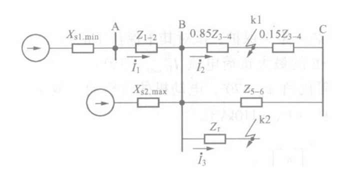


图 3.38 计算Ⅱ段分支系数的等值电路

当保护 3 的Ⅰ段末端 k1 短路时，分支系数为

$$K_{\mathrm{b}}=\frac{I_2}{I_1}=\frac{X_{\mathrm{s1}}+Z_{1-2}+X_{\mathrm{s2}}}{X_{\mathrm{s2}}}\times\frac{(1+0.15)Z_{3-4}}{2Z_{3-4}}$$

$$=(\frac{X_{\mathrm{s1}}+Z_{1-2}}{X_{\mathrm{s2}}}+1)\times\frac{1.15}{2}$$

由上式可看出，为使 K_{b} 最小，则 X_{s1} 应取最小， X_{s2} 最大，而相邻线路并列平行二分支应投入，因而

$$K_{\mathrm{b.min}}=(\frac{20+12}{30}+1)\times\frac{1.15}{2}=1.19$$

于是得 $Z_{\mathrm{set.1}}^{\mathrm{II}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}(Z_{1-2}+K_{\mathrm{b.min}}Z_{\mathrm{set.3}}^{\mathrm{I}})=0.8\times(12+1.19\times20.4)=29\Omega$

(2) 按躲过相邻变压器低压出口 k2 点短路整定，即与相邻变压器瞬动保护（差动保护）相配合，因而 $Z_{\mathrm{set.1}}^{\mathrm{II}}=K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}(Z_{1\text{-}2}+K_{\mathrm{b.min}}Z_{\mathrm{T}})$

$K_{\mathrm{b.min}}$ 为在相邻变压器出口 k2 点短路时对保护 1 的最小分支系数，由图 3.38 可知

$$K_{\mathrm{b.min}}=\frac{X_{\mathrm{s1.min}}+Z_{1-2}}{X_{\mathrm{s2.max}}}+1=\frac{20+12}{30}+1=2.07$$

于是 $Z_{\mathrm{set.1}}^{\mathrm{II}}=0.7\times(12+2.07\times44.1)=72.3\ \Omega$，此处取 $K_{\mathrm{rel}}^{\mathrm{II}}=0.7$ 。

取以上计算结果中较小者为Ⅱ段整定值，即 $Z_{\mathrm{set}}^{\mathrm{II}}=29\,\Omega$

2）灵敏性校验：按本线路末端短路计算，即

$$K_{\mathrm{sen}}=\frac{Z_{\mathrm{set.1}}^{\mathrm{II}}}{Z_{1-2}}=\frac{29}{12}=2.42>1.5$$ 满足要求。

3）动作时限：与相邻保护 3 的Ⅰ段瞬时保护配合，则

$$t_1^{\mathrm{II}}=t_3^{\mathrm{I}}+\Delta t=0.5\mathrm{s}$$

它能同时满足与相邻保护及与相邻变压器保护配合的要求。

4．距离 III 段的整定计算

1）整定阻抗：按躲过最小负荷阻抗整定

$$Z_{\mathrm{L.min}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{L.min}}}{\dot{I}_{\mathrm{L.max}}}=\frac{(0.9\sim0.95)\dot{U}_{\mathrm{N}}}{\dot{I}_{\mathrm{L.max}}}$$

按最低电压考虑，则

$$Z_{\mathrm{L.min}}=\frac{0.9\dot{U}_{\mathrm{N}}}{\dot{I}_{\mathrm{L.max}}}=\frac{0.9\times110}{\sqrt{3}\times0.35}=163.5\Omega$$

因继电器取为相间接线方式的方向阻抗继电器，所以

$$Z_{\text{set.1}}^{\text{III}}=\frac{Z_{\text{L.min}}}{K_{\text{rel}}^{\text{III}}K_{\text{ss}}K_{\text{re}}\cos(\varphi_{\text{L}}-\varphi_{l})}$$

取 $K_{\text{rel}}^{\text{III}}=1.2$，$K_{\text{ss}}=1.5$，$K_{\text{re}}=1.15$，$\varphi_{l}=70^{0}$，$\varphi_{\text{L}}=\cos^{-1}0.9=25.8^{0}$

于是 $$Z_{\text{set.1}}^{\text{III}}=\frac{163.5}{1.2\times1.15\times1.5\times\cos(25.8^{0}-70^{0})}=110.2\ \Omega$$

2）灵敏性校验

当本线路末端短路时，灵敏系数为

$$K_{\text{sen(1)}}=\frac{Z_{\text{set.1}}^{\text{III}}}{Z_{1\text{-}2}}=\frac{110.2}{12}=9.18>1.5$$ 满足要求。

当相邻元件末端短路时，灵敏系数可分两种情况。

（1）相邻线路末端短路时

$$K_{\text{sen(2)}}=\frac{Z_{\text{set}}^{\text{III}}}{Z_{1-2}+K_{\text{b.max}}Z_{3-4}}$$

式中 $K_{\text{b.max}}$ 为相邻线路 3-4 末端短路时对保护 1 的最大分支系数，如图 3.39 所示。取 X_{s1} 可能的最大值为 $X_{s1.\max}$，X_{s2} 可能最小值为 $X_{s2.\min}$，而相邻平行线路取单回线运行，则

$$K_{\text{b.max}}=\frac{I_2}{I_1}=\frac{X_{\text{s1.max}}+Z_{1-2}}{X_{\text{s2.min}}}+1=\frac{25+12}{25}+1=2.48$$

图 3.39 校验Ⅲ段灵敏系数时计算分支系数等值电路

于是 $$K_{\text{sen(2)}}=\frac{Z_{\text{set.1}}^{\text{III}}}{Z_{1-2}+K_{\text{b.max}}Z_{3-4}}=\frac{110.2}{12+2.48\times24}=1.54>1.2$$ 满足要求。

（2）相邻变压器低压出口 k2 点短路时，如图 3.39 所示。则

$$K_{\text{b.max}}=\frac{I_3}{I_1}=\frac{X_{\text{s1.max}}+Z_{1-2}}{X_{\text{s2.min}}}+1=\frac{25+12}{25}+1=2.48$$

于是 $$K_{\text{sen(2)}}=\frac{Z_{\text{set.1}}^{\text{III}}}{Z_{1-2}+K_{\text{b.max}}Z_{\text{T}}}=\frac{110.2}{12+2.48\times44.1}=0.9<1.2$$ 不满足要求，需对变压器增加近后备保护，此略。

3）动作时限整定

$$t_1^{\mathrm{III}} = t_8^{\mathrm{III}} + 3\Delta t = 0.5 + 3\times 0.5 = 2\mathrm{s}$$

或 $t_1^{\mathrm{III}} = t_{10}^{\mathrm{III}} + 2\Delta t = 1.5 + 2\times 0.5 = 2.5\mathrm{s}$

取其中时限较长者，即 $t_1^{\mathrm{III}} = 2.5\mathrm{s}$

[例 3.2]如图 3.40 所示，已知线路 L1、L2 的最大负荷 $I_{\mathrm{L.max}} = 400\mathrm{A}$，L3、L4 距离保护 Z_3、Z_4的三段定值如下：

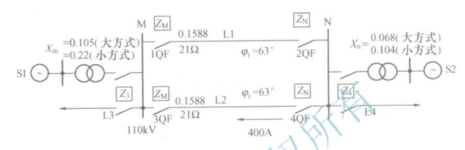


图 3.40 整定计算系统图

Z_3 各段定值 ： Ⅰ段 $Z_3^{\mathrm{I}} = 10\Omega$，$t_3^{\mathrm{I}} = 0\mathrm{s}$；

Ⅱ段 $Z_3^{\mathrm{II}} = 18\Omega$，$t_3^{\mathrm{II}} = 0.5\mathrm{s}$；

Ⅲ段 $Z_3^{\mathrm{III}} = 50\Omega$，$t_3^{\mathrm{III}} = 2.5\mathrm{s}$。

Z_4 各段定值： Ⅰ段 $Z_4^{\mathrm{I}} = 12\Omega$，$t_4^{\mathrm{I}} = 0\mathrm{s}$；

Ⅱ段 $Z_4^{\mathrm{II}} = 20\Omega$，$t_4^{\mathrm{II}} = 1\mathrm{s}$；

Ⅲ段 $Z_4^{\mathrm{III}} = 60\Omega$，$t_4^{\mathrm{III}} = 3\mathrm{s}$。

发电厂及系统变电站变压器各侧母线上均装设有母线差动保护，发电厂 M 及系统 N 的运行方式及其参数已归算到以 100MVA 为基准，请计算双回线路 L1、L2 两端距离保护各段定值。

解：1.计算双回线路 M 侧的距离保护定值

(1) 距离保护Ⅰ段

按躲过本线路末端故障整定（按一次线路正序阻抗表示，下同），即

$$Z_{\mathrm{set.M}}^{\mathrm{I}} = K_{\mathrm{rel}} Z_{\mathrm{L1}} = 0.85\times 21 = 17.85\Omega$$

$$t_{\mathrm{M}}^{\mathrm{I}} = 0\mathrm{s}$$

(2) 距离保护Ⅱ段

1)按与线路 L4 距离保护Ⅰ段相配合整定，即

$$Z_{\mathrm{set.M}}^{\mathrm{II}} = K_{\mathrm{rel}} Z_{\mathrm{L1}} + K_{\mathrm{rel}}^{'} K_{\mathrm{b}} Z_4^{\mathrm{I}} = 0.85\times 21 + 0.8K_{\mathrm{b}}\times 12$$

分支系数（助增系数）的 K_{b} 计算方式为双回线路中之一回线断开，电厂 M 为大运行方式，系统 N 为小运行方式，则由图 3.41 可知，由发电厂 M 至变电所 N 母线处之综合阻抗为

$$X_{\Sigma 1} = 0.105 + 0.1588 = 0.2638$$

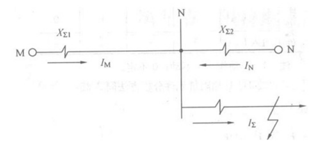


图 3.41 II段助增系数计算等效图

由系统 N 至变电所母线处的综合阻抗为

$$X_{\Sigma 2}=0.104$$

$$K_b=\frac{X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 2}}=3.53$$

$$Z_{set.M}^{II}=0.85\times 21+0.8\times 3.53\times 12=51.74\Omega$$

$$K_{sen}=\frac{51.74}{21}=2.46$$

2)按与线路 L4 距离保护 II 段定值相配合整定，即

$$Z_{set.M}^{II}=K_{rel}Z_{L1}+K_{rel}^{'}K_bZ_{4.}^{II}$$

$$=0.85\times 21+0.8\times 3.53\times 20=74.33\Omega$$

$$K_{sen}=\frac{74.33}{21}=3.54$$

3)按与双回线路中另一回线路对侧断路器距离保护 I 段相配合整定（例如 1QF 的 II 段与 4QF 的 I 段配合整定，此时考虑另一回线路的 M 侧断路器 3QF 为断开方式)，即

$$Z_{set.M}^{II}=K_{rel}Z_{L1}+K_{rel}^{'}K_bZ_{set}^{I}$$

$$=0.85\times 21+0.8\times 3.53\times (0.85\times 21)=68.25\Omega$$

$$K_{sen}=\frac{68.25}{21}=3.25$$

选取 $Z_{set.M}^{II}=51.74\Omega$，$t_M^{II}=0.5s$， $K_{sen}=2.46$。

(3) 距离保护III段

1)按与线路 L4 距离保护 II 段定值相配合整定，即

$$Z_{set.M}^{III}=K_{rel}Z_{L1}+K_{rel}^{'}K_bZ_4^{II}$$

$$=0.85\times 21+0.8\times 3.53\times 20=74.33\Omega$$

$$K_{sen}=\frac{74.33}{21}=3.54,\quad t_M^{III}=1+0.5=1.5s$$

2)按与线路 L4 距离保护III段定值相配合整定，即

$$Z_{set.M}^{III}=0.85\times 21+0.8\times 3.53\times 60=187.27\Omega$$

$$K_{sen}=\frac{187.27}{21}=8.9,\quad t_M^{III}=3+0.5=3.5s$$

3)与双回路中另一回线路对侧断路器 4QF 距离保护 II 段相配合整定（考虑另一回线路在发电厂 M 侧的断路器 3QF 为断开方式)，为此须先按图 3.42 整定 L2 上 4QF 距离保护的 II 段定值，此时助增系

数为

$$K_{b.N}=\frac{X_{\Sigma_1}+X_{\Sigma_2}}{X_{\Sigma_1}}=\frac{0.22+0.2248}{0.22}=2.02$$

与 Z_3 Ⅰ段配合时，Z_N的Ⅱ段定值为 $Z_N^{III}=0.85\times21+0.8\times2.02\times10=34\Omega$，时限取 0.5s。

故 Z_M的Ⅲ段定值为 $Z_M^{III}=0.85\times21+0.8\times3.53\times34=72.8\Omega$

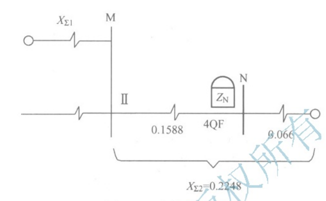


图 3.42　部分系统等值图

4）按最大负荷电流整定，$I_{fh.max}=400A$

$$Z_{L.min}=\frac{0.95\times110}{0.4\times\sqrt{3}}=150.8\Omega$$

$$Z_{set.M}^{III}=\frac{Z_{L.min}}{K_{rel}K_{re}K_{ss}\cos(\varphi_L-\varphi_l)}$$

K_{rel}—可靠系数，取 1.2；K_{re}—返回系数，取 1.2；K_{ss}—自启动系数，取 2，φ_L 取 37^0，

φ_l 取 63^0，从而可知　$Z_{set.M}^{III}=\frac{150.8}{1.2\times1.2\times2\times\cos(37^o-63^o)}=58.2\Omega$

$t_M^{III}=2s$

选取　$Z_{set.M}^{III}=58.2\Omega$，$t_M^{III}=2s$。

对本线路末端，灵敏度为 $K_{lm}=\frac{58.2}{21}=2.77$

双回线路并列运行时，若一回线路故障被切除，另一回线路负荷将增大一倍，故距离保护按双回路最大负荷电流整定时，则将降低相邻线路后备保护的灵敏度。

2. 计算双回线路 N 侧的距离保护定值

（1）距离保护Ⅰ段

与 M 端距离保护Ⅰ段相同，即

$Z_{set。N}^{I}=K_{rel}Z_{L1}=0.85\times21=17.85\Omega$，　时限 $t_N^I=0s$。

（2）距离保护Ⅱ段

1）按与 Z_3 Ⅰ段相配合整定（前面已计算），即

$Z_{\text{set.N}}^{\text{II}}=34\ \Omega$，时限 t_{N}^{II} =0.5s。

2）按与 Z_3 II段相配合整定，即

$$Z_{\text{set.N}}^{\text{II}}=K_{\text{rel}}Z_{\text{L1}}+K_{\text{rel}}^{'}K_{\text{b.N}}Z_3^{\text{II}}=0.85\times21+0.8\times2.02\times18=46.94\ \Omega$$

时限 t_{N}^{II} =0.5s。

3）与双回路 L1 线路 M 端距离保护II段（即 M 端双回 L1 线路 I 段定值 Z_{M}^{I} =17.85Ω）配合整定，即 $Z_{\text{set.N}}^{\text{II}}=K_{\text{rel}}Z_1+K_{\text{rel}}^{\text{I}}K_{\text{b.N}}Z_3^{\text{II}}$ =0.85×21+0.8×2.02×17.85=46.70Ω

时限　　t_{N}^{II} =0.5s。

选取　　$Z_{\text{set.N}}^{\text{II}}=46.70\ \Omega$，$t_{\text{N}}^{\text{II}}$ =0.5s

灵敏系数　$K_{\text{sen}}=\dfrac{46.65}{21}=2.22$

(3) 距离保护III段

1）与 Z_3 保护II段配合整定，即

$$Z_{\text{set.N}}^{\text{III}}=K_{\text{rel}}Z_1+K_{\text{rel}}^{'}K_{\text{b.N}}Z_3^{\text{II}}=0.85\times21+0.8\times2.02\times18=46.94\ \Omega$$

2）与 Z_3 保护III段配合整定，即

$$Z_{\text{set.N}}^{\text{III}}=K_{\text{rel}}Z_1+K_{\text{rel}}^{'}K_{\text{b.N}}Z_3^{\text{III}}=0.85\times21+0.8\times2.02\times50=98.65\ \Omega$$

3）与双回路 M 端距离保护III段配合整定，即

$$Z_{\text{set.N}}^{\text{III}}=K_{\text{rel}}Z_1+K_{\text{rel}}^{'}K_{\text{b.N}}Z_{\text{M}}^{\text{III}}=0.85\times21+0.8\times2.02\times58=111.59\ \Omega$$

4）按最大负荷整定，即

$$Z_{\text{set.N}}^{\text{III}}=\frac{Z_{\text{L.min}}}{K_{\text{rel}}K_{\text{re}}K_{\text{ss}}\cos(\varphi_{\text{L}}-\varphi_l)}=\frac{150.8}{1.2\times1.2\times2\times\cos(37^{\circ}-63^{\circ})}=58.2\ \Omega$$

选取　　$Z_{\text{set.N}}^{\text{III}}=58.2\ \Omega$，$t_{\text{N}}^{\text{III}}=2.5+0.5=3\text{s}$

灵敏系数　　$K_{\text{sen}}=\dfrac{58.2}{21}=2.76$。

通过以上例题可知，整定计算非常繁琐，尤其在工程实际中，其网络图要比在此列举的例题复杂的多，因此，仅按本章中所述及的整定原则往往是不理想的，经常会出现顾此失彼，即四性难以同时满足的情况，因此，整定计算被人喻为是一门“艺术”，工程实际中，技术人员往往要根据电网继电保护装置运行的规程、线路及负荷的重要程度、运行参数等实际情况综合考虑，即顾此不薄彼，从而保证庞大复杂电网的安全可靠运行。

3.6 对距离保护的评价及应用范围

对距离保护的评价，应根据继电保护的 4 个基本要求来评定。

（1）选择性。根据距离保护的工作原理可知，它可以在多电源复杂网络中保证有选择性动作。

（2）快速性。距离保护 I 段是瞬时动作，但是只能保护线路全长 80%～85%，因此，两段加起来就有 30%~40%的线路长度内的故障不能从两端瞬时切除，在一端须经 0.35～0.5s 的延时后，经距离II段来切除，因此，对 220kV 及以上系统，根据系统稳定运行的需要，要求全长无时限切除线路任一点的短路，这时距离保护就不能作为主保护来应用。

（3）灵敏性。距离保护不但反应故障时电流增大，同时反应故障时电压降低，因此，灵敏性比电流、电压保护高。更主要的是距离保护 I 段保护范围不受系统运行方式改变的影响，而其他两段保护范围受系统运行方式改变影响也较小，因此，保护范围比较稳定。

（4）可靠性。距离保护受各种因素的影响，如系统振荡、短路点的过渡电阻和电压回路断线等，因此，在保护中需采取各种防止或减少这些因素影响的措施。如需要采用复杂的阻抗继电器和较多的辅助继电器，使整套保护装置比较复杂，故可靠性相对比电流保护低。距离保护目前应用较多的是保护电网的相间短路。对于大电流接地系统中的接地故障可由简单的阶段式零序电流保护装置切除，或者采用接地距离保护，通常在 35kV 电网中，距离保护作为复杂网络相间短路的主保护；在 110kV 及以上系统中，相间短路距离保护和接地短路距离保护主要作为全线速动主保护的相间短路和接地短路的后备保护，对于不要求全线速动的高压线路，距离保护可作为线路的主保护。

【本章小结】介绍了距离保护的基本工作原理、实现方法及影响距离保护正确动作的原因，重点介绍了过渡电阻、分支电路及系统振荡对测量阻抗的影响及防止措施，同时给出距离保护整定的原则及其使用范围。

【关键词】 **距离保护** Distance Protection； **测量阻抗** Measuring Impedance； **阻抗继电器** Impedance Relay ；**电力系统振荡 Power Swingt**

【阅读材料】 美加 8.14 大停电

北京时间 2003 年 8 月 15 日凌晨 4 点许（美国东部时间 14 日下午 4 点），美国纽约市曼哈顿首先发生大面积停电，继而底特律、克利夫兰和波士顿等美国东部几大城市相继漆黑一片，而与上述城市同用一个供电网络的加拿大首都渥太华和商业中心多伦多也没能幸免于难。不少人瞬间产生第一直觉，难道是“911”重演？但随即在美国加州的美国总统布什发表讲话，“这不是恐怖袭击。”那么，美国电网怎么了？它缘何如此脆弱，使美加几个大城市陷入了长久的黑暗……

受这次停电影响的区域总面积为 9300 平方公里。面对这有史以来对该地区影响最大的一次断电事故，身处其中的数百万美国和加拿大人算是亲身领教了现代交通运输体系对电的严重依赖程度。没有了电，上至飞机航班，下至地铁运输，整个交通系统立刻陷入全面瘫痪。

在纽约，成千上万名乘客被困在漆黑的地铁隧道里。公共汽车就地停止运营，造成公路堵塞。同时，办公楼内电梯停运、空调没法运转，许多上班族和商场内的顾客陷入恐慌，不顾一切地冲到曼哈顿的各条大街上。当时气温高达 33℃，但由于公路被堵，他们只好忍耐炎热步行回家。想给家人通告一下吧，可因为有成千上万的人同时用手机打电话，造成网络繁忙而打不通，纽约生活的方方面面都已经被完全打乱，纽约市在很长一段时间内没有一辆公共汽车、火车、地铁在运营。

图 3.43、图 3.44 为停电后纽约市的交通状况。



图 3.43　美加大停电时纽约交通状况之 1



图 3.44　美加大停电时纽约交通状况之 2

在有 200 万居民的加拿大第一大城市多伦多，交通系统也陷入瘫痪状态，地铁站已经被关闭，数千人无奈地冒着 30℃的高温徒步行进。多伦多北部的萨德伯里还有 100 多名矿工被困在井下，好在他们还有充足的水，井下通风的电也可由备用电机提供。加拿大安大略省已宣布进入紧急状态，要求人们没有急事暂时不要出门。

14 日傍晚，加拿大一些城市已陆续开始恢复供电，但官方称要完全恢复恐怕还要等段时间。

事故发生后，联邦调查局、国土安全部和纽约警方很快做出反应。他们一致认为，没有证据表明这次大面积停电是恐怖分子发动的袭击，也没有证据表明这是一起犯罪案件。

综合收集到的资料，特别是事故过程中事件发生的顺序和过程中潮流的变化，基本可以判断这次大停电对全网而言属于潮流大范围转移导致的快速电压崩溃，同时伴有潮流大范围转移和窜动导致的断面线路相继跳闸和系统解列后的频率崩溃。

美国有关人士认为，这次大范围的停电事故突出地暴露了北美电力系统过于陈旧的弱点。

第二次世界大战结束后，北美电力传输系统急剧扩展。加州电力研究所的资料显示，美国的电力需求在过去 10 年中增加了 30%，但与此同时输电能力却仅仅增长了 15%。因此，工业部门的官员警告说，面对今天巨大的用电压力，北美电力系统早已显得“力不从心”。

8 月 14 日，闷热的天气像“毛毯”一样包裹着美国东北地区，空调的用电量占了传输线总电量的 30%，严重超过传输网络所能承受的负担。毫无疑问，这对陈旧的电力系统来说更是雪上加霜。

新墨西哥州长、前美国能源部部长比尔理查德森对 CNN 表示，我们这个超级大国所拥有的电力网是一个“第三世界水平的电力网”，我们需要新的网络。现在的问题是，没有人愿意修建具有足够能力的电力传输网。

美联社报道说，美国电力公司和政府电力管理部门的官员就曾表示，多年来，美国全国的电力供应网一直面临全面更新的问题，之所以迟迟未能更换，主要存在三个障碍，一是建设费用庞大，二是环保主义者反对，三是部分民众不希望电力设施离自家太近。

资料来源：科技日报，兰克等

习　题

3.1 填空题

1．测量保护安装处至故障点的距离，实际上是测量保护安装处至故障点之间的______大小，故又称_______保护。

2．当测量阻抗 Z_{cl} 小于整定阻抗 Z_{zd} 时，短路点在保护范围________，保护________。

3．距离保护装置一般由________、________、________、________、________ 五部分组成。

4．当保护定值不变时，分支系数愈________，保护范围愈 ________ ，灵敏性________。

5．正常运行时，阻抗继电器测量的阻抗为________，短路故障时，测量的阻抗为________。

6．对阻抗继电器的接线方式的基本要求有________和________。

7．使测量阻抗增大的分支电流成为________，使测量阻抗减小的分支电流成为________。

8．对于距离保护后备段，为了防止距离保护超越，应取常见运行方式下________的助增系数进行整定。

9．如图 3.42 所示电力系统，已知线路 MN 的阻抗为 10Ω，线路 NP 的阻抗为 20Ω；当 P 点三相短路时，电源 A 提供的短路电流为 100A，电源 B 提供的短路电流为 150A，此时 M 点保护安装处的测量阻抗为________。

图 3.42 填空题 9 网络图

10．对于全阻抗继电器和椭圆特性阻抗继电器，________受过渡电阻影响较小，________受系统振荡影响较小。

3.2 选择题

1．加到阻抗继电器的电压电流的比值是该继电器的（ ）。

A． 整定阻抗　　B． 测量阻抗

C． 动作阻抗　　D． 正序阻抗

2．保护线路发生三相短路，相间距离保护的测量阻抗（ ）接地距离保护的测量阻抗。

A． 大于　　B． 小于

C． 大于等于　　D． 等于

3．电力系统发生振荡时，各点电压和电流（ ）。

A．均作往复性摆动　　B．均会发生突变

C．变化速度较快　　D．电压作往复性摆动

4．反应 AB 相间短路的阻抗继电器采用 0^0 接线，则加入继电器的电压、电流分别为（ ）。

A． $\dot{U}_{BC}$，$\dot{I}_A$　　B． $\dot{U}_{AC}$ ，$\dot{I}_A-\dot{I}_{AC}$

C． $\dot{U}_{AB}$ ，$\dot{I}_A-\dot{I}_B$　　D． $\dot{U}_{AB}$ ，$\dot{I}_A$

5．余弦型比相器的动作范围为（ ）。

A． $-90^0\sim0^0$　　B． $0^0\sim90^0$

C． $0^0\sim180^0$　　D． $-90^0\sim90^0$

6．比相式方向阻抗继电器的动作方程为（ ）。

A. $-90^0 \le \arg\dfrac{Z_{\rm m}-Z_{\rm set}}{Z_{\rm m}} \le 90^0$　　B. $-90^0 \le \arg\dfrac{Z_{\rm set}-Z_{\rm m}}{Z_{\rm m}} \le 90^0$

C. $-90^0 \le \arg\dfrac{Z_{\rm set}-Z_{\rm m}}{Z_{\rm m}} \le 90^0$　　D. $-90^0 \le \arg\dfrac{Z_{\rm m}-Z_{\rm set}}{Z_{\rm set}} \le 90^0$

7．过渡电阻对距离保护的影响（　　）。

A．使测量阻抗减小，保护范围减小　　B．使测量阻抗增大，保护范围减小

C．使测量阻抗减小，保护范围增大　　D．使测量阻抗增大，保护范围减小

8．相对于短路故障，系统振荡时电气量的变化下列哪个正确（　　）。

A．系统中会出现零序分量　　B．系统中会出现负序分量

C．电压电流的相位差随振荡角不同而变化　　D．电流电压变化速度较快

3.3 判断题

1．与电流电压保护相比，距离保护主要优点在于完全不受系统运行方式的影响。（　）

2．接地距离保护不仅能反应单相接地故障，而且能反应两相接地故障。（　）

3．接地距离保护的测量元件接线采用 60^0 接线。（　）

4．距离保护是保护本线路及相邻线路正方向故障的保护，它具有明显的方向性，因此，距离保护第III段的测量元件也不能用具有偏移特性的阻抗继电器。（　）

5．方向阻抗继电器中，电抗变压器的转移阻抗角决定着继电器的最大灵敏角。（　）

6．分支电流对距离保护 I、II 段均有影响。（　）

7．发生短路故障时故障点的过渡电阻总是使距离保护的测量阻抗增大。（　）

8．长线路的测量阻抗受故障点过渡电阻的影响比短线路大。（　）

9．当振荡变化周期大于该点距离保护某段的整定时间时，则该段距离保护不会误动作。（　）

10．距离保护中的振荡闭锁装置，是在系统发生振荡时，才起动去闭锁保护。（　）

3.4 问答题

1．何谓距离保护，它有什么优缺点？

2．距离保护装置由哪些主要部分组成，各起什么作用？

3．阻抗继电器都有哪些种类？

4．什么是保护安装处的负荷阻抗、短路阻抗、系统等值阻抗？

5．什么是故障环路？相间短路与接地短路所构成的故障环路的最明显差别是什么？

6．构成距离保护为什么必须用故障环上的电压、电流作为测量电压和电流？

7．距离保护的第 I 段保护范围为什么选择为被保护线路全长的 85%以内？

8．为了切除线路上各种类型的短路，一般配置哪几种接线方式的距离保护协同工作？

9．在本线路上发生金属性短路，测量阻抗为什么能够正确反应故障的距离？

10．何谓方向阻抗继电器的最大灵敏角？为什么要调整其最大灵敏角等于被保护线路的阻抗角？

11．影响阻抗继电器正确测量的因素有哪些？

12．振荡时对距离保护有何影响？

13．为什么阻抗继电器的动作特性必须是一个区域?画出常用动作区域的形状并陈述其优缺点。

14．画图并解释偏移特性阻抗继电器的测量阻抗、整定阻抗和动作阻抗的含义。

15. 电力系统振荡和短路的区别是什么？

16. 振荡闭锁装置必须满足哪些要求？

17. 用相位比较方法实现距离继电器有何优点，以余弦比相公式为例说明之。

18. 什么是最小精确工作电流和最小精确工作电压？测量电流或电压小于最小精工电流或电压时会出现什么问题？

19. 为什么要规定阻抗继电器的精确工作电流这一指标，它有什么意义？

20. 在整定值相同的情况下，比较方向圆特性、全阻抗圆特性、苹果特性、橄榄特性的躲负荷能力。

21. 某距离保护 II 段整定已考虑助增电流的影响，若运行中助增电流消失，保护区如何变化，为什么？

22. 在整定距离保护 II 段时，为什么采用最小分支系数？在检验距离保护 III 段时，为什么采用最大分支系数？

23. 过渡电阻对距离 I 段的影响大还是对距离 II 段的影响大，为什么？

24. 距离保护装置应该采用哪些反事故技术措施？

25. 采用故障时短时开放的方式为什么能够实现振荡闭锁？开放时间选择的原则是什么？

26. 对单相负载（如电气化铁路）对常规距离保护有何影响？

27. 什么是距离保护的稳态超越，克服稳态超越影响的措施有哪些？

28. 什么是距离保护的暂态超越，克服暂态超越影响的措施有哪些？

29. 串联补偿电容器对距离保护的正确工作有什么影响，如何克服这些影响？

30. 用故障分量构成继电保护有什么优点？

3.5 计算题

1. 有一方向阻抗继电器的整定阻抗为 $5\angle 75°$ 欧，现测量阻抗为 $3\angle 15°$ 欧，问该方向阻抗继电器能否起动？

2. 在图 3.43 所示网络中，各线路均装设有距离保护，请对保护 1 的相间短路保护Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ段参数进行整定计算。已知线路 AB 的最大负荷电流为 $I_{\text{L·max}}=350\text{A}$，功率因数 $\cos\varphi=0.9$，各线路正序阻抗为 $Z_1=0.4\Omega/\text{km}$，阻抗角 $\varphi_{\text{L}}=70^0$，电动机的自启动系数 $K_{\text{ss}}=1.5$，正常时母线最低工作电压 $U_{\text{N·min}}=0.9U_{\text{N}}$，其余参数如图中所示。

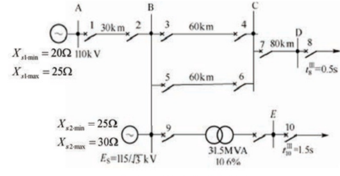


图 3.43　计算题 2 网络图

3. 如图 3.44 所示，各线路均装设距离保护，请对保护 1 的距离Ⅲ段保护参数进行整定计算。$K_{\text{rel}}=1.25$；$K_{\text{re}}=1.2$；$K_{\text{ss}}=1$；$Z_1=0.4\Omega/\text{km}$；$U_{\min}=0.9\times110\text{kV}$。

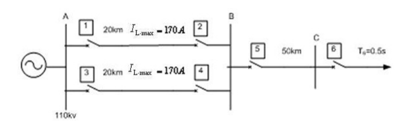
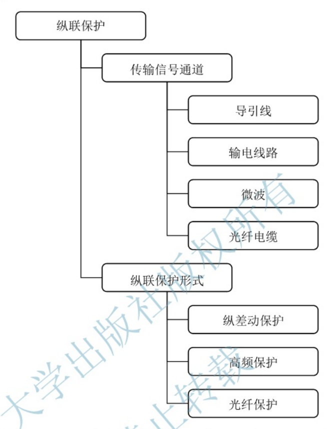


图 3.44　计算题 3 网络图



第 4 章 输电线路纵联保护

【本章知识结构图】



仅反应线路一侧的电气量不可能快速区分本线路末端和对侧母线故障，为了有选择性地切除线路上任意点的故障，采用电流、距离保护等阶段式保护的配合，对于线路末端故障需要这些保护的II段延时切除，这在220kV及以上系统中难于满足系统稳定性对快速切除故障的要求，因此，就需要能瞬时切除故障线路的保护，什么样的保护能满足这一要求，通过本章学习就可予以解答。

【本章教学目标与要求】

掌握输电线路纵联保护的基本原理及基本类型；

掌握输电线路方向高频保护、高频闭锁保护及光纤保护的基本原理；

熟悉方向高频保护相地高频通道各部分的作用；



本章导图　500kV 输电线路

4.1 输电线路纵联保护的基本原理与类型

由于电流、电压保护和距离保护都是单端量保护，为了保证选择性，其动作值的整定必须与下一元件的保护配合，以致瞬时切除故障的范围只能是被保护线路的一部分。对于距离保护 I 段，在单侧电源线路上最多只能瞬时切除被保护线路全长的 80%~85%的故障，在双侧电源线路上瞬时切除故障的范围大约只有线路全长的 60%~70%；在被保护线路其余部分发生故障时，都只能由带延时的保护来切除。这对于很多重要的高压输电线路是不允许的，延时切除故障难以保证电力系统的安全稳定运行。因此，能够无延时切除线路上任意处故障的输电线路纵联保护就是在这种背景下产生的。

所谓输电线路纵联保护，就是利用某种通信通道（通道）将输电线路两端的保护装置纵向联结起来，把各端的电气量传送到对端，将两端的电气量进行比较以判断故障是在本线路范围之内还是范围之外，从而决定是否动作跳闸。

4.1.1 输电线路纵联保护的基本原理

输电线路的纵联保护通过比较流过两端电流的幅值、两端电流相位和流过两端功率的方向等，利用信息通道将一端的电气量或其用于被比较的特征传送到对端，比较两端不同电气量的差别构成不同原理的纵联保护。以两端输电线路为例，一套完整的纵联保护的一般构成如图 4.1 所示。

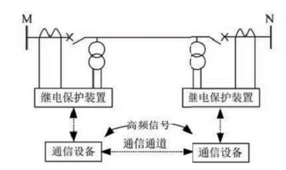


图 4.1　输电线路纵联差动保护结构简图

图 4.1 中每一侧的继电保护装置通过电压互感器 TV、电流互感器 TA 获取本侧的电压、电流，根据不同的保护原理提取或形成两侧被比较的电气量的故障特征，一方面通过通信设备将本侧的电气量特征传送给对侧，另一方面通过通信设备接收对侧发送过来的电气量特征，之后将两侧的电气量特征信息进行比较，判断是否保护范围内故障并采取相应的动作。

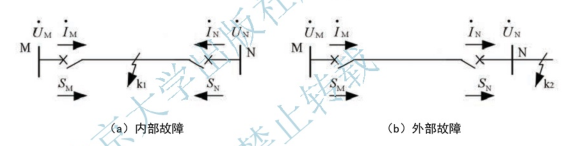
纵联保护利用了线路发生区内故障、区外故障时，依据电力线两侧的电流波形、电流相位、功率方向以及两侧测量阻抗的差异可以构成以下不同的保护原理。

1. 纵联电流差动保护

利用了输电线路两侧电流波形或电流相量和的特征构成纵联电流差动保护。该保护原理利用的故障特征为：

（1）线路发生区内短路时，不考虑线路分布电容的影响，两侧的短路电流均流入故障点如图 4.2（a）所示，即有 $\sum\dot{I}=\dot{I}_M+\dot{I}_N=\dot{I}_{k1}$；

（2）线路正常运行和外部短路时，线路电流从送电侧流入受电侧，即被保护线路两侧的电流大小相等、方向,相反如图 4.2（b）所示，即有 $\sum\dot{I}=\dot{I}_M+\dot{I}_N=0$ 。



（a）内部故障　　　　（b）外部故障

图 4.2 双端电源线路内部、外部故障时的故障特征对比

2. 方向比较式纵联保护

利用输电线路两侧的功率方向相同或相反的特征可构成方向比较式纵联保护。该保护原理利用的故障特征为：

（1）线路发生区内故障时，短路功率由两侧电源提供，均由母线流向线路，即两侧功率方向相同，都为正方向（ $S_M(+)$、$S_N(+)$ ），如图 4.2（a）所示。

（2）线路发生区外故障时，远故障点功率由母线流向线路，功率方向为正，而近故障点功率由线路流向母线，功率方向为负，两侧功率方向相反，如图 4.2（b）所示。另外线路正常运行时，送电侧的功率方向由母线流向线路，为正方向；而受电侧的功率方向为线路流向母线，为负方向。

3. 电流相位比较式纵联保护

利用两侧电流相位的特征差异，比较两侧电流的相位关系构成电流相位比较式纵联保护。该保护原理利用的故障特征为（假定全系统阻抗角均匀，两侧电动势角相同）：

（1）当线路发生内部短路时，两侧电流均由母线流向线路，其对应的相位由线路阻抗角决定，即两侧电流同相位（ $\arg(\dot{I}_M/\dot{I}_N)=0°$ ）；

（2）而正常运行和外部短路时，两侧电流均由母线流向线路，其对应的相位由线路阻抗角决定，即两侧电流反相位（$\arg(\dot{I}_M/\dot{I}_N)$ =180°）。

4. 距离纵联保护

构成原理与方向比较式纵联保护相似，只不过用阻抗元件替代功率方向元件。该保护原理利用的故障特征为：

（1）线路区内故障时，输电线路两侧的测量阻抗都是短路阻抗，一定位于距离保护 II 段的动作区内，两侧的距离 II 段同时启动；

（2）当线路发生外部短路时，两侧的测量阻抗也是短路阻抗，但一侧为反方向，即至少有一侧距离 II 段不启动。当线路正常运行时，两侧的测量阻抗为负荷阻抗，距离保护 II 段不启动。

4.1.2 输电线路纵联保护的基本类型

输电线路纵联保护为了交换两侧的电气量信息，需要利用通道。采用的通道不同，在装置原理、结构、性能和适用范围等方面就具有很大的差别。输电线路纵联保护按照所利用通道的不同可以分为以下 4 种类型。

（1）导引线纵联保护（简称导引线保护）；

（2）微波纵联保护（简称微波保护）；

（3）电力线载波纵联保护（简称高频保护）；

（4）光纤纵联保护（简称光纤保护）。

导引线通道。这种通道需要铺设电缆，其投资随线路长度而增加。当线路较长（超过 10 km 以上）时就不经济。导引线越长，安全性越低。导引线中传输的是电信号。在中性点接地系统中，除了雷击外，在接地故障时地中电流会引起地电位升高，也会产生感应电压，对保护装置和人身安全构成威胁，也会造成保护不正确动作。所以导引线的电缆必须有足够的绝缘水平（例如 15 kV 的绝缘水平），从而使投资增大。导引线直接传输交流电量，故导引线保护广泛采用差动保护原理，但导引线的参数（电阻和分布电容）直接影响保护性能，从而在技术上也限制了导线保护用于较长的线路。

微波通道。微波通道与输电线没有直接的联系，输电线发生故障时不会对微波通信系统产生任何影响，因而利用微波保护的方式不受限制。微波通信是一种多路通信系统，可以提供足够的通道，彻底解决了通道拥挤的问题。微波通信具有很宽的频带，线路故障时信号不会中断，可以传送交流电的波形。但由于信号衰耗，其传输的距离仅几十千米，长线路需要建设多个中继站，维护工作量大，且抗干扰能力差，因此，目前在系统中已停用。

电力线载波通道。这种通道在保护中应用最广。载波通道由高压输电线及其加工和连接设备（阻波器、结合电容器及高频收发信机）等组成。高压输电线机械强度大，十分安全可靠。但正是在线路发生故障时通道可能遭到破坏（高频信号衰减增大），为此需考虑在此情况下高频信号是否能有效传输的问题。当载波通道采用“相一地”制，在线路中点发生单相短路接地故障时衰减与正常时基本相同，但在线路两端故障时衰减显著增大。当载波通道采用

"相－相"制，在单相短路接地故障时高频信号能够传输，但在三相短路时仍然不能。为此载波保护在利用高频信号时应使保护在本线路故障信号中断的情况下仍能正确动作。

光纤通道。光纤通道与微波通道有相同的优点。光纤通信也广泛采用（PCM）调制方式。当被保护线路很短时，通过光缆直接将光信号送到对侧，在每半套保护装置中都将电信号变成光信号送出，又将所接收之光信号变为电信号供保护使用。由于光与电之间互不干扰，所以光纤保护没有导引线保护的问题，在经济上也可以与导引线保护竞争。近年来期发展的在架空输电线的接地线中铺设光纤的方法既经济又安全，很有发展前景。当被保护线路很长时，应与通信、远动等复用。

4.2 输电线高频保护基本概念

导引线纵联差动保护原理简单，但需要敷设专用电缆通信通道，难以适用于长距离高压输电线路。而以输电线本身作为通信通道的纵联保护则可以有效解决该问题。所谓输电线高频保护，将线路两侧的电流相位（或功率方向）信息转换为高频信号，经相应的高频耦合装置将高频信号加载在被保护线路上，通过被保护线路通道将高频信号传递到对侧，对侧再经过高频耦合装置接收高频信号，进而实现两侧电气量特征的比较以判断短路是在被保护输电线本身还是在相邻线路上。

4.2.1 输电线高频通道的构成

输电线高频保护是利用输电线载波通信方式构成的，是以输电线作为高频保护通道来传输高频信号。为了使输电线路既能传输工频电流同时又能传输高频信号，必须在输电线路上装设专用的加工设备，将同时在输电线路上传送的工频和高频电流分开，并将高频收、发信机与高压设备隔离，以保证二次设备和人身的安全。

输电线高频通道有 “相——相”和“相——地”两种方式。

（1）“相——相”制。

高频收、发信机通过结合电容器连接在输电线路两相导线之间；高频通道的衰耗小，但所需加工设备多，投资大。

（2）“相——地”制。

高频收、发信机通过结合电容器连接在输电线一相导线与大地之间；高频通道传输效率低，但所需加工设备少，投资较小。

目前，国内外一般都采用如图 4.3 所示“相一地”制接线方式。通常高频加工设备包括高频阻波器、耦合电容器、连接滤波器、高频电缆等组成，主要元件作用分述如下。

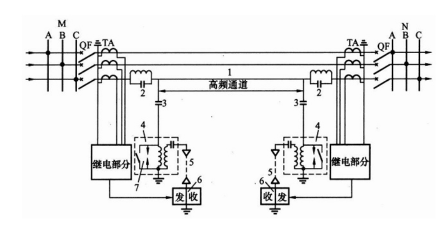


图 4.3 “相一地”制高频通道原理接线图

1一输电线路，2—高频阻波器，3一耦合电容器，4一连接滤波器， 5一高频电线；

6一高频收、发信机， 7一接地刀闸/保护间隙

1．高频阻波器

高频阻波器是由一电感线圈和可调电容器组成的并联谐振回路，串接在输电线的工作相中，阻止本线路的高频信号外泄到外线路。阻波器对 50Hz 工频电流呈现电感线圈的阻抗，数值很小，约为 0.04Ω左右，不影响工频电流的正常传输；而阻波器对高频载波电流呈现很高阻抗，其阻抗为其并联谐振阻抗，值约大于 1000Ω，这样高频信号就被限制在被保护线路的范围以内，而不能穿越到相邻线路上去，以免产生不必要的损耗和造成对其它高频通道的干扰。

2．耦合电容器和连接滤波器

耦合电容器亦称结合电容器，它与连接滤波器共同配合，将高频信号传递到输电线路上，同时使高频收发信机与工频高压侧可靠隔离；另外耦合电容器对于工频电流呈现极大的阻抗，故由它所导致的工频泄漏电流极小。连接滤波器由一个可调节的空心变压器及连接至高频电缆一侧的电容器组成，连接滤波器与耦合电容器组成高频串联谐振回路，高频电缆侧线圈电感与电容也组成高频串联谐振回路，保证高频电流顺利通过。

耦合电容器与连接滤波器构成一个带通滤波器，使得所需频带的高频电流能够通过。同时，带通滤波器还实现了波阻抗的匹配，即线路一侧看入的阻抗与输电线路的波阻抗匹配；而从电缆侧看入的阻抗与高频电缆的波阻抗相匹配。对“相一地”制方式，输电线路侧的波阻抗约为 400Ω，高频电缆侧的波阻抗约为 100Ω。这样，就可以避免高频信号的电磁波在传送过程中发生反射，减小高频信号的附加衰耗。

3．高频电缆

高频电缆是将位于主控制室的高频收、发信机与户外变电站的阻波器、结合电容器和连接滤波器连接起来的导线，以便用最小的衰耗传送高频信号。从主控制室到户外变电站这段距离，虽然高频电缆只有几百米，但因其所传送的信号频率很高，如果采用普通电缆，衰减很大，因此，多采用单芯式同轴电缆，其波阻抗约为 100Ω。

4．保护间隙、接地刀闸

保护间隙是高频通道的辅助设备，作为过电压保护用，当线路上遭受雷击产生过电压时，通过放电间隙击穿接地，以保护收发信机不致被击毁。

并联在连接滤波器两侧的接地刀闸，是当调整或检修高频收发信机和连接滤波器时，用它来进行安全接地，以保证人身和设备的安全。

5．高频收、发信机

发信机部分由继电保护来控制。通常是在电力系统发生故障时，保护部分启动之后它才发出信号，但也有采用长期发信、故障时停信或改变信号频率的方式。由发信机发出的高频信号，一方面通过高频通道输送到对侧收信机接收，另一方面也可以被本侧收信机接收。高频收信机接收到本侧和对侧所发送的高频信号后，经过比较和判断后，决定继电保护动作跳闸或闭锁。

4.2.2 高频通道的工作方式

纵联保护根据通道传送的信号判断故障是发生在被保护线路内，还是被保护线路外。因此，信号的性质和功能直接影响到保护的性能。

1．按照正常运行时有无高频信号分类

1)正常时无高频电流方式

正常运行时，高频通道中无高频电流通过，当电力系统故障时，发信机由启动元件发信，通道中才有高频电流出现。这种方式又称为故障时发信方式，其优点是可以减小对通道中其它信号的干扰，可延长收发信机的寿命。其缺点是要有启动元件，延长了保护的动作时间，需要定期启动发信机来检查通道是否良好。目前广泛采用这一方式。

2)正常时有高频电流方式

正常运行时，发信机发信，通道中有高频电流通过，故这种方式又称长期发信方式。其优点是：使高频通道处于经常的监视状态，可靠性较高；保护装置中无需收发信机的启动元件，使保护简化，并可提高保护的灵敏度。其缺点是：收发信机的使用年限减少，增加了通道的干扰。

3)移频方式

正常运行时，发信机发出f_1频率的高频电流、用以监视通道及闭锁高频保护。当线路发生故障时，高频保护控制发信机移频，发出f_2频率的高频电流。移频方式能经常监视通道状况，提高通道工作的可靠性，加强了保护的抗干扰能力。

需要注意的是应该将“高频信号”与“高频电流”两个概念区分开来。所谓高频信号是指线路一端的高频保护在故障时向线路另一端的高频保护所发出的信息。因此，在经常无高频电流（故障时发信方式）的通道中，故障时发出高频电流的出现就是一种信号，但在经常有高频电流（长期发信方式）的通道中，当故障时将高频电流停止或改变其频率也是代表一种信号。

2．以其传送的信号性质不同分类

1）跳闸信号

跳闸信号是线路对侧发来的直接使保护动作于跳闸的信号。即“出现高频信号就构成跳

闸的充分条件，不论本侧保护装置是否启动”。它与继电保护的动作信号之间是“或”的逻辑关系如图 4.4（a）所示。



图 4. 4 高频保护信号逻辑

采用跳闸信号的优点是能从一端判定内部故障，缺点是抗干扰能力差，多用于线路变压器组上。

2）允许信号

允许信号是允许保护动作与跳闸的高频信号。即“收到高频信号仅构成跳闸的必要条件，必须再和保护装置的动作行为组成“与”门，才构成跳闸的充分条件。没有高频信号则构成不跳闸的充分条件”。其动作逻辑如图 4.4（b）所示。

采用允许信号的主要优点是动作速度快，在主保护双重化的情况下，可以利用一套闭锁信号，另一套用允许信号。

3）闭锁信号

闭锁信号是制止保护动作将保护闭锁的信号。当线路内部故障时，两侧保护不发出闭锁信号，通道中无闭锁信号，保护作用于跳闸。即 “出现高频信号构成不跳闸的充分条件，没有高频信号仅是跳闸的必要条件，后者和保护装置的动作行为组成“与”门，构成跳闸的充分条件”。其工作逻辑如 4.4（c）所示。

采用闭锁信号的优点是可靠性高，线路故障对传送闭锁信号无影响，所以在以输电线路作高频通道时，在我国广泛采用这种信号方式；缺点是这种信号方式要求两端保护元件动作时间和灵敏系数在很好配合，所以保护结构复杂，动作速度慢。

3. 按照高频信号的比较方式不同分类

1）间接比较方式

高频信号仅将本侧交流继电器对故障的判断结果传送到对侧去，线路两侧保护根据两侧交流继电器对故障判断的结果作出最终判断。所以高频信号间接代表交流电气量，可以简单地用高频电流的有或无来代表逻辑信号的“是”或“非”。这种方式传输信息量小，对通道要求简单，被广泛采用。

2）直接比较方式

高频信号直接将两侧交流电气量传送到对侧，在两侧保护的继电器中直接比较两侧的交流电气量，然后作出故障判断。由于这种比较方式要传送交流量，比较复杂，要求传输的信息大，需要通信容量大的通道才能应用，如微波通信、光纤通信。

4.2.3 高频保护的类型

根据高频信号的利用方式一般将常用的高频保护分以下 4 种：

（1）高频闭锁方向保护（间接比较式闭锁信号）；

（2）高频闭锁距离保护（间接比较式闭锁信号）；

（3）相差高频保护（直接比较式闭锁信号和允许信号）；

（4）高频远方跳闸保护(间接比较式跳闸信号)。

目前，高频闭锁方向保护、高频闭锁距离保护原理等广泛用于高压或超高压线路的常规与微机成套线路保护装置中，作为线路的主保护。

4.3 高频闭锁方向保护

4.3.1 高频闭锁方向保护的基本原理

高频闭锁方向保护是通过高频通道间接地比较被保护线路两侧的功率方向，保护采用故障时发信方式。规定以母线指向线路的功率方向为正方向；以线路指向母线的功率方向为反方向。当系统发生故障时，接收反向功率的一侧发出的高频信号，本侧和对侧的收信机收到高频信号保护不动作，所以称为高频闭锁方向保护。

以图 4.5 所示的系统为例说明高频闭锁方向保护的工作原理。

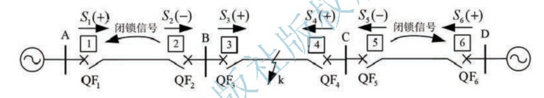


图 4.5 高频闭锁方向保护的作用原理

当 BC 段的 k 点发生短路时，保护 3 和 4 的方向元件反应为正方向短路[即 $S_3(+)$、$S_4(+)$]，两侧都不发高频闭锁信号，因此，断路器 QF_3 和 QF_4 都跳闸，瞬时将短路切除。而当 k 点发生短路时，对于非故障线路 AB 和 CD，保护 2 和 5 的方向元件反应为反向短路[即 $S_2(-)$、$S_5(-)$]，对应的保护发出的高频闭锁信号，此信号一方面被本身的收信机接收，同时经过输电线路分别送至对端的保护 1 和 6，使保护装置 1、2 和 5、6 都被高频信号闭锁，因此，断路器 QF_1、QF_2 和 QF_5、QF_6 不跳闸，保证非故障线路 AB 和线路 BC 不会被误切除。

这种按闭锁信号构成的保护只在非故障线路上才传送高频信号，而在故障线路上并不传送高频信号。因此，在故障线路上，由于短路使高频通道可能遭到破坏时（如断线故障），并不会影响保护的正确动作，这是它的主要优点，也是闭锁式高频保护在我国得到广泛应用的主要原因之一。

高频闭锁方向保护装置包括启动元件和方向元件。启动元件主要作用是故障时启动发信机发信，发出高频闭锁信号；方向元件则是测量功率方向，在保护正方向故障时才准备好跳闸回路。按照高频闭锁方向保护的启动元件不同可分为以下 3 种。

4.3.2 电流启动方式的高频闭锁方向保护

图 4.6 为接于被保护线路一端的半套用电流元件启动的高频闭锁方向保护原理框图。

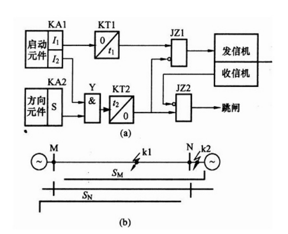


图 4.6 电流元件启动的高频闭锁方向保护的方框图

线路每一侧的半套保护中装有两个高低灵敏度的电流启动元件 KA1 和 KA2，灵敏度较高 KA1（整定值小）用来启动高频发信机发送闭锁信号，而灵敏度低的 KA2（整定值大）则用来启动保护的跳闸回路。

方向元件 S 用来判别短路功率的方向，只有测得正方向故障时才动作。

时间元件 KT1 是瞬时动作、延时返回的时间电路，在启动元件返回后，使得反向功率侧的发信机继续发送闭锁信号；保证外部故障切除后，反向功率侧的发信机发出闭锁信号的时间再延长 t_1 时间（t_1 常取 0.5s），以保证远故障点侧不会由于启动元件和方向元件返回慢而导致误跳闸。

时间 KT2 是延时动作、瞬时返回的时间电路，其作用是推迟停信和接通跳闸回路的时间，以等待对侧闭锁信号的到来，防止线路外部故障时远离故障侧的保护在未收到近故障侧发信机传送来的高频信号而误动作，一般 t_2 取 4～16ms，应大于高频信号在被保护线路上的传输时间。

图 4.6 中逻辑与门 Y 综合启动元件 KA2 和方向元件 S 的作用，禁止门 JZ1 闭锁发信回路，禁止门 JZ2 闭锁跳闸回路。

现将保护的工作情况说明如下：

（1）内部故障，对于两侧电源供电网络，两侧保护的启动元件动作，KA1 启动发信，KA2 启动跳闸回路，两侧的方向元件测得正方向故障而动作；经 t_2 延时后将控制门 JZ1 闭锁，使两侧的发信机停止发信，而后两侧收信机收不到对侧的闭锁信号，两侧的控制门 JZ2 均开放，两侧保护动作使断路器跳闸，切除故障线路。对于单侧电源供电线路发生内部故障时，送电侧的保护动作情况同两侧电源网络内部故障时的保护动作情况相同，受电侧保护不启动，即不发闭锁信号，经 t_2 延时后送电侧保护的收信机收不到受电侧的闭锁信号，送电侧保护的控制门 JZ2 开放，送电侧保护动作使断路器跳闸，正确切除故障线路。

（2）正常运行时，启动元件 KA1 和 KA2 均不动作，发信机不发信，保护不动作。

（3）外部故障时，启动元件动作，启动发信机发信，但是靠近故障点侧保护的方向元件

反应的是反方向故障，反向元件不动作，近故障点侧发信机继续发闭锁信号，两侧的收信机均收到该闭锁信号，两侧保护被闭锁，从而有选择性不动作。

需要指出的是，保护装置中采用两个灵敏度不同的电流启动元件，是考虑到被保护线路两侧电流互感器的误差不同和两侧电流启动元件动作值的离散性。如果只用一个电流启动元件，在被保护线路外部短路而短路电流接近启动元件动作值时，近故障点侧的电流启动元件可能拒动，导致该侧发信机不发信；而远故障点侧的电流启动元件可能动作，导致该侧发信机仅在t_1时间以内发信，经t_1延时后，收信机就收不到高频闭锁信号，从而引起该侧断路器误跳闸。采用两个动作电流不等的电流启动元件，就可以防止这种无选择性动作。用动作电流较小的电流启动元件 KA1（灵敏度较高）去启动发信机，用动作电流较大的启动元件 KA2（灵敏度较低）启动跳闸回路，这样，被保护线路任一侧的启动元件 KA2 动作之前，两侧的启动元件 KA1 都已先动作，从而保证了在外部短路时发信机能可靠发信，避免了上述的误动作。

低定值的启动元件 KA1 动作电流按照躲开正常运行时最大负荷电流整定，即

$$I_{op1}=\frac{K_{rel}K_{ss}}{K_{re}}I_{L\max} \tag{4-1}$$

式中：K_{rel}——可靠系数，一般采用 1.1～1.2；

K_{ss}——自启动系数，一般采用 1～1.5；

K_{re}——电流继电器的返回系数，一般采用 0.85。

高定值启动元件 KA2 动作电流按照与 KA1 做灵敏度配合整定，一般取 KA2 的动作电流为$I_{op2}=(1.5\sim2)I_{op1}$，并按照线路末端短路进行灵敏系数校验，要求灵敏系数大于等于 2。

通常，线路两侧电流启动元件的动作电流应选为同一数值，即两侧的两个电流启动元件的动作值应分别相等。在电流启动元件的灵敏度不能满足要求时，可采用负序电流元件作为启动元件，其动作电流按躲过最大负荷情况下出现的最大不平衡电流整定。

4.3.3 方向元件启动方式的高频闭锁方向保护

图 4.7 为方向元件启动的高频闭锁方向保护的方框图。

图 4.7（a）中$S-$、$S+$为功率方向元件。$S-$为在反方向短路时动作的方向元件，用以启动发信机发闭锁信号；$S+$为在正方向短路时动作的方向元件，用以启动跳闸回路。

图 4.7（b）为方向元件$S-$和$S+$的动作范围。

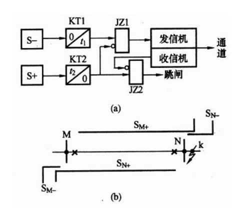


图 4.7 方向元件启动的高频闭锁方向保护的方框图

保护的动作情况分析如下：

（1）内部短路时，对于两侧电源线路保护反应的功率方向为正，两侧方向元件 $S-$ 均不动作，两侧发信机均不启动；而两侧方向元件 $S+$ 均动作，延时 t_2 后，经禁止门 JZ2 作用于两侧断路器同时跳闸。而对于单侧电源线路内部故障时，受电侧保护不动作亦不发闭锁信号，送电侧保护动作方向元件 $S+$ 均动作，且收不到受电侧闭锁信号，延时 t_2 后禁止门 JZ2 开放送电侧断路器跳闸切除故障线路。

（2）正常运行时，无负序功率，两侧方向元件均不动作，即不启动发信机发信，亦不开放跳闸回路。

（3）外部短路时（如图 4.7 中的 k 点），远故障点侧（M 侧）的方向元件 S_M+ 动作，启动跳闸回路；近故障点侧（N 侧）的方向元件 S_N+ 动作，启动该侧发信机发闭锁信号。两侧的收信机收到近故障点侧发来的闭锁信号，禁止门 JZ2 闭锁，两侧断路器不会误跳闸。

为了保证被保护线路外部短路时保护的选择性，一方面两侧方向元件在灵敏度上应当配合，即近故障点侧的 $S-$ 应较远故障点侧的 $S+$ 更灵敏；另一方面近故障点侧的 $S-$ 的动作区必须大于远故障点侧的 $S+$ 的动作区。

时间元件 KT1、KT2 的作用和整定，分别与用电流元件启动的高频闭锁方向保护中的 KT1、KT2 相同。时间元件 KT2 动作后将禁止门 JZl 闭锁，是为了防止在内部短路的暂态过程中，方向元件 $S-$ 可能短暂动作而引起保护动作的延缓。

方向元件启动的高频闭锁方向保护的总体构成比较简单，这是这种保护方式的主要优点。但是，由于没有另外的启动元件，方向元件的动作功率必须大于最大负荷功率，以避免输电线路正常运行时由输送最大负荷引起的保护误动作。由于负序功率方向继电器能反应各种短路故障，保护无动作死区，且在正常情况和系统振荡时不会误动作，因此，目前广泛采用负序方向元件来代替一般方向元件，从而使方向元件启动高频闭锁方向保护性能更趋完善。

4.3.4 远方启动方式的高频闭锁方向保护

图 4.8 为远方启动方式的高频闭锁方向保护的方框图。

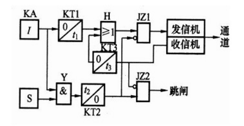


图 4.8 远方启动的高频闭锁方向保护的方框图

该方式只有一个电流启动元件 KA。发信机既可由本侧启动元件 KA 启动，也可由收信机收到对端的高频信号后，经延时元件 KT3、或门 H、禁止门 JZ1 来启动。这样在外部短路时，即使只有一侧启动元件 KA 启动发信机，另一侧通过高频通道接收到远方传来的信号也将发信机启动，后者的启动方式称为远方启动。

在两侧相互远方起信后，为了只使发信机固定启动一段时间，在图 4.8 中设置时间元件 KT3，该时间元件为瞬时启动、延时返回，延时返回时间 t_3 就是发信机固定启动时间。在收信机收到对侧发来的高频信号后，时间元件 KT3 立即发出一个持续时间 t_3 的脉冲，经或门 1、禁止门 2 使发信机发信。经延时 t_3 后，远方启动回路就自动切断。t_3 的时间应大于外部短路可能持续的时间，一般取 $t_3 = 5 \sim 8\text{s}$。这是因为在外部故障切除前，若近故障点侧的发信机由远方启动的高频发信机停止发信，对侧保护因收不到高频闭锁信号而误动作。

接下来分析远方启动方式的高频闭锁方向保护的动作情况：

（1）内部故障时，对于两侧电源线路，两侧电流启动元件动作，启动发信机发信；方向元件动作，启动跳闸回路；延时 t_2 后，经禁止门 JZ2 作用于两侧断路器同时跳闸。而对于单侧电源线路内部故障时，送电侧保护动作启动发信同时启动本侧跳闸回路；受电侧保护启动元件不动作，但受电侧经远方启动发信号后，由于启动元件不动作，发信机不停信，以致受电侧持续收到闭锁信号，将导致送电侧保护拒动作。

（2）正常运行时，保护的电流启动元件均不启动，发信机不发信，保护均闭锁不动作。

（3）外部短路时，由于近故障点侧保护的正向方向元件 S 反应为反方向故障不动作，禁止门 JZ1 不会被闭锁，发信机能够发信，向对侧传送高频闭锁信号。对侧收信机收到高频信号，所以不会误跳闸。如果此时近故障点侧启动元件 KA 不动作，远故障点侧的启动元件 KA 及正向方向元件 S 动作时，则远故障点侧将误跳闸。为了避免这种误动作，时间元件 KT2 的整定值应大于高频信号在高频通道上往返一次所需的时间，一般取 $t_2 = 20\text{ms}$。这样在外部故障时，远故障点侧的收信机能够收到近故障点侧用远方启动方式发来的闭锁信号，将保护可靠闭锁。

采用远方启动方式，只需设一个启动元件，可以提高保护的灵敏性，但动作速度较慢。在单侧电源线路内部短路时，受电侧被远方启动后不能停信，这样就会造成电源侧保护拒动。因此，远方启动方式的高频闭锁保护一般不应用在单侧电源线路。

4.4　高频闭锁距离保护

4.4.1 高频闭锁距离保护的基本原理

高频闭锁方向保护可以快速切除保护范围内部的各种故障，但不能作为变电所母线和下级线路的后备。对于距离保护，只能在线路中间 60%~70%长度范围内瞬时切除故障，而在其余的 30%~40%长度的范围内要以一端带有 II 段的时限切除。而距离保护中所用到的主要元件（启动元件、测量元件）都是时限高频闭锁保护所必需的。因此，在某些情况下，将两者结合起来，做成高频闭锁的距离保护，使得内部故障时能够瞬时动作，而在外部故障时带有不同的动作时限，起到后备保护的作用，兼备两种保护的优点，并能简化整个保护的接线。

高频闭锁距离保护是通过高频通道间接地比较被保护线路两侧的测量阻抗的方向，保护采用故障时发信方式。当系统发生故障时，测量阻抗为负的一侧发出的高频信号，本侧和对侧的收信机收到高频信号保护不动作，所以称为高频闭锁距离保护。

以图 4.9 所示的系统为例说明高频闭锁距离保护的工作原理。

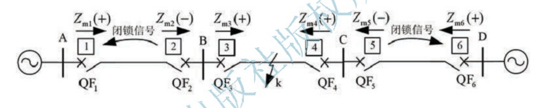


图 4.9　高频闭锁距离保护的作用原理

当 BC 段的 k 点发生短路时，保护 3 和 4 的测量阻抗反应为正阻抗[即 $Z_{m3}(+)$、$Z_{m4}(+)$]，两侧都不发高频闭锁信号，因此，断路器 QF_3 和 QF_4 都跳闸，瞬时将短路切除。而当被保护线路 BC 内部 k 点发生短路时，对于非故障线路 AB 和 CD，保护 2 和 5 的测量阻抗反应为负阻抗[即 $Z_{m2}(-)$、$Z_{m5}(-)$]，对应的保护发出的高频闭锁信号，此信号一方面被本身的收信机接收，同时经过输电线路分别送至对端的保护 1 和 6，使保护装置 1、2 和 5、6 都被高频信号闭锁，因此，断路器 QF_1、QF_2 和 QF_5、QF_6 不跳闸，保证非故障线路 AB 和线路 BC 不会被误切除。

同样，高频闭锁距离保护只在非故障线路上才传送高频信号，而在故障线路上并不传送高频信号。因此，在故障线路上，由于短路使高频通道可能遭到破坏时（如断线故障），并不会影响保护的正确动作。

4.4.2 高频闭锁距离保护构成及工作原理

高频闭锁距离保护装置包括距离保护和高频闭锁两部分，如图 4.10 所示。

距离保护部分采用三段式，I、II、III 段都采用独立的方向阻抗继电器作为测量元件，各段定值的动作时限的整定同第 3 章的所述一致。高频闭锁部分与距离保护共用一个负序电流元件 KA（也可以利用距离保护 III 段）作为故障启动发信元件，利用距离保护 II 段作为方向判别元件和停信元件，以距离保护 I 端作为独立跳闸段。高频闭锁部分的时间元件 KT1、KT2 同前节电流启动式高频方向闭锁保护中的时间元件相同。

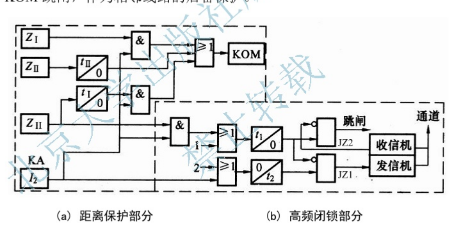
现结合图 4.10 分析高频闭锁距离保护的工作原理。

（1）内部故障，对于两侧电源供电网络，两侧保护的负序电流启动元件 KA 和距离保护 II 段 Z_{II} 均动作，KA 启动发信，Z_{II} 启动跳闸回路，经 t_1 延时后将控制门 JZ1 闭锁，使两侧的发信机停止发信，而后两侧收信机收不到对侧的闭锁信号，两侧的控制门 JZ2 均开放，两侧保护动作使断路器跳闸，切除故障线路。在线路一侧或两侧[故障发生在线路中间（60%~70% 长度以内时）]的距离保护 I 段（电流元件 I_2、出口跳闸继电器 KOM）也可动作跳闸，但受振荡闭锁回路的控制。

对于单侧电源供电线路发生内部故障时，送电侧的保护动作情况同两侧电源网络内部故障时的保护动作情况相同，受电侧保护不启动，即不发闭锁信号，经延时后送电侧保护的收信机收不到受电侧的闭锁信号，送电侧保护的控制门 JZ2 开放，送电侧保护动作使断路器跳闸，正确切除故障线路。

（2）正常运行时，启动元件 KA 不动作，发信机不发信，保护不动作。

（3）外部故障时，靠近故障点侧保护的负序电流元件 KA 启动，测量阻抗元件 Z_{II} 不启动，跳闸回路不启动，近故障点侧持续发信，两侧收信机收到闭锁信号，闭锁两侧的跳闸回路。此时，如果故障线路的保护不动作或拒跳，远故障点侧的距离保护 II 或 III 段可以经出口继电器 KOM 跳闸，作为相邻线路的后备保护。



（a）距离保护部分　　　（b）高频闭锁部分

图 4.10 高频闭锁距离保护的方框图

另外，高频闭锁零序方向纵联保护的实现原理与高频闭锁距离保护的实现原理相同，只需要用零序方向元件替代测量阻抗元件。图 4.10 中，只需要将端子 1、端子 2 与零序电流方向保护相连，即可构成高频闭锁零序方向保护。

4.4.3 高频闭锁距离保护的动作特性分析

通过以上分析，高频闭锁距离保护具有以下特点：

1）能够正确反映并快速切除各种对称和不对称短路故障，且保护具有足够的灵敏度。负序电流启动元件为瞬时动作的电流元件，即使是对称性故障在暂态过程中亦存在负序分量。

2）高频闭锁距离保护中的距离保护可兼作相邻线路和元件的远后备保护，即使是高频部分故障，距离保护仍可以继续工作，能够独立对线路进行保护。

3）高频闭锁距离保护受检修运行方式影响较大，当后备保护检修时，主保护需要退出

运行。

4.5 光纤纵联保护

电力线载波通道是我国电力系统广泛采用的一种保护信号的传输通道，但由于保护的线路往往很长，信号经受到恶劣气候(如风、霜、雨、雪) 和雷电的影响，导致传输质量较差；并且载波通道传递的保护信息量非常有限，对于诸如纵联电流差动保护将难以实现。采用微波通道来传输继电保护信号也有广泛的应用，但微波信号除经常受到气候变化的影响，同时微波通道也存在如信号衰减快、通道易中断、中间转接环节较多等问题，导致其传输质量也往往不能保证。而光纤通信具有抗电磁干扰能力强、绝缘性能好、传输频带宽和损耗小等优点，用光纤通道来传输继电保护信号已是一种发展趋势，在国内外电力系统中得到越来越广泛的应用。

4.5.1 光纤通道的特点

光纤通道是基于光导纤维作为传输介质的一种通信手段。光纤通道相对于其他传统通道如电力线、微波等，具有如下特点：

1．传输质量高，误码率低

光纤通道很容易满足继电保护对通道所要求的准确性。即发信端保护装置发送的信息，经通道传输后到达收端，使收信端保护装置所看到的信息与发信端原始发送信息完全一致。

目前所采用的光纤电流差动保护对通道误码要求为两种：一种是向量式光纤差动，采用传输向量的工作原理，发生误码时，可以用向量递推等方式来合成。由于其动作灵敏度低、速度慢，因而对通道要求较低，通道误码率约为10^{-3}～10^{-5}。另一种是传输采样值的光纤差动，由于其灵敏度高、速度快，因而对通道要求也高，误码率约为10^{-7}。而光纤通信所提供的通道的误码率约为10^{-9}～10^{-11}。显然，光纤通道很容易满足继电保护对通道所要求的“透明度”，通信设备正常工作时，通道误码是完全能满足继电保护对通道的要求。

2．频带宽，传输信息量大

线路两端保护装置尽可能多的交换信息量，如电流差动保护利用到的两端故障电流量的瞬时值，从而可以大大提高继电保护动作的正确性和可靠性。

3．抗干扰能力强

由于光信号的特点,可以有效的防止雷电、系统故障时产生的电磁干扰，且抗腐蚀和耐潮等，因此，光纤通道最适合应用于继电保护通道。

以上光纤通道的三个特点，是继电保护所采用的常规通道形式所无法比拟的。在通道选择上应为首选。但是基于光缆的物理特性，抗外力破坏能力较差，推荐采用光纤复合架空地线(OPGW)，可以有效的防止外力破坏的发生。

4.5.2 光纤纵联保护的构成

图4.11为光纤纵联保护构成框图。

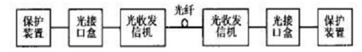


图 4. 11 光纤通道保护结构

保护侧电/光(发信)、光/电(收信) 的交换器装置在背板上的光接口盒内，完成数字信号与光信号的转换。通过光发生器和光接收器，可直接与外部光纤通道连接，使装置外部所传信号为光信号，增强了信号抗干扰能力。传送数据时，在本地接口盒内将数字电信号转化为光信号，然后传送到对侧；远端接收到对方所传送的光信号后，再在其本地接口盒内将光信号转化为数字信号，以供保护装置进行故障判别。

4.5.3 光纤保护通道方式

目前，采用光纤通道方式的纵联保护得到了越来越广泛的应用，在现场运行设备中，主要有三种方式：专用光纤、脉冲调制PCM 64 kbit/s复用和同步数字体系SDH 2Mbit /s复用方式。

1. 专用光纤方式

光纤与纵联保护配合构成专用光纤纵联保护。采用允许式，在光纤通道上传输允许信号和直跳信号。专用方式需为继电保护敷设专用的光纤通道，在此通道中只传输继电保护的信息。

1) 专用光纤通道结构

其结构如图4.12所示。

图 4. 12 专用光纤通道结构

在专用光纤通信方式下，保护装置的光接收接口和发送接口直接通过专用光纤与对侧保护装置的光发送接口和接收接口相连。这种方式中间环节少、简单可靠。

2) 通信性能影响因素

专用光纤方式由于受光收、发接口的光信号发送功率和接收灵敏度的制约，对通信距离有所限制；并且在专用方式下，通信通道的中间环节比较少，而且传的都是光信号，受到的干扰也比较少，所以对通道性能的影响主要应该考虑光发送的时钟方式、光发送功率、光接收功率、饱和功率和通道裕度。

(1) 时钟方式

专用光纤方式下，光纤通信系统中没有其他时钟基准，需要至少设置一端光收、发接口的光发送模块为主时钟，从而为光收、发接口的光发送数据采用提供时钟基准。一般情况下，可以设置两侧装置发送时钟工作在“主-主”方式下，此时发送数据时钟采用内部时钟，接

收数据时钟采用从接收数据流提取的时钟。

(2) 光发送功率

光发送功率是影响传输距离的重要影响因素，在专用方式下，一定要对光收、发接口的光发送功率进行测量和检验。测量时，需用光纤跳线一端接光收、发接口的光发射口，另一端接光功率计测试端，读出表上显示稳定值(dB)，发送功率为该值加上2dB(跳线光纤接头衰耗1dB×2个)，要求光发射功率不小于光额定发送功率。

(3) 光接收功率

光接收功率对光纤通道的通信性能有很大的影响，如果接收功率低于光接收模块的灵敏度，就会导致传输性能极大降低，所以在测出发送功率后，还要测量光接收功率。测量时，把从对端接收到的光信号接入光功率计，此时光功率计测量的功率数值即为接收功率，要求最小接收功率满足光器件接收功率的灵敏度，最好具有一定裕度。

(4) 光器件饱和功率

光接收功率过低会导致通信传输性能的降低，同样如果光接收功率太大也会导致通信传输性能的降低。如果光接收功率过大，以致大于光接收接口的饱和功率，此时通信传输性能也会下降，所以需要对饱和功率进行监测，把测量的接收功率和光器件的饱和功率进行比较，要求最大接收功率要小于饱和功率。在专用方式下，一般不会出现接收功率超过饱和功率的情况。

(5) 通道裕度计算

由于光模块工作受温度和老化影响很大，为保证通道工作正常，需进行光纤通道裕度校验。通道裕度校验时，发射功率和接收灵敏度取测量修正值或光模块出厂标称值，其他参数取经验参考值，要保证系统衰减余量一般不少于6dB，也有文献要求通道裕度为3dB。

光纤通道衰耗有：

光纤衰耗0.3dB/km(单模)；接头衰耗1dB/点；熔接衰耗0.2dB/点。

通道裕度校验公式：

光发射功率-光接收灵敏度-0.3×距离- 1×接头个数- 0.2×熔接个数>6 dB

(6) 抗干扰屏蔽要求

对专用光纤方式，由于传输的信号都是光信号，而且中间没有经过其他设备，其通信通道具有很好的抗干扰屏蔽性能，一般不需要进行特殊处理，而保护装置本身的抗干扰屏蔽问题由装置本身保证。

(7) 匹配问题

由于专用光纤方式下，中间环节少，一般是同一个厂家的保护与通信设备之间以及通信设备之间互相连接，在实际应用中，设备之间的匹配基本只需考虑内部阻抗、电平和编码的匹配，不需要考虑不同厂家设备之间的匹配，一般较少出现匹配问题。

由于受光收、发接口工作距离的限制和敷设光缆费用的制约。专用方式的通信距离一般在 100 km 以内。专用方式的优点是光缆的纤芯经熔纤后由光缆终端箱直接接入保护设备的

光收、发接口，避免了与其他装置的联系，减少了信号的传输环节，不需附加其他设备，实现简单、可靠性高，而且由于不涉及通信调度、管理也较方便。缺点是光纤利用率降低(与复用比较)，保护人员维护通道设备没有优势；而且在带路操作时，需进行本路保护与带路保护光芯的切换，操作不便，而且光接头经多次的拔插，易造成损坏。目前，专用光纤方式主要应用于距离较短的城网线路保护以及发电厂与电力系统之间重要线路的保护。

2. PCM 64 kit/s复用方式

光纤与纵联保护配合构成复用光纤纵联保护。也采用允许式，保护装置发出的允许信号和直跳信号需要经音频接口传送给复用设备，然后经复用设备上光纤通道。

1) PCM 64kbit/s复用方式结构

其结构如图4.13所示。

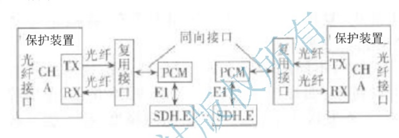


图 4.13　PCM 64 kbit/s 复用方式结构

PCM 64kbit/s复用通信方式是保护装置光收、发接口利用数字复用技术通过复用接口与PCM复接设备及复用通道和对侧保护装置相连。保护装置和PCM复用设备之间的互连由一个64kbit/s 同向数据复用接口实现，其一般采用同步通信方式，通信规约符合CCITT标准中G.703 码型协议。一般情况下，保护设备在保护室，而64 kbit/s数据复用接口在通信机房，保护室的保护装置将数据通过光纤传送给设在通信室中的64 kbit/s同向数据复用接口。64 kbit/s数据信号(含64kHz定时信号和8kHz的8bit组相位定时信号)经保护专用PCM复接成2 Mbit/s信号，进而复接成为标准的155Mbit /s信号进入光路传输。

2) 通信性能影响因素

在64kbit/s复用通道方式下，光收、发接口直接发送的光信号传送到通信室的数据复用接口，在光纤中光的直接传输距离较短，一般不存在发送功率不足、接收功率不足或通道裕度不够的情况。同时在64kbit/s复用方式下，中间设备较多，对通信性能的影响相对比较大。其影响因素主要有时钟方式、通道裕度、屏蔽干扰、匹配问题和通道延时等因素。

(1) 时钟方式。

64 kbit/s复用方式下，由于PCM设备提供主时钟，要求其他连接到PCM的设备设置为从时钟，所以两端保护装置的光收、发接口的光发送数据的时钟方式要设置为“从时钟”，即数据的发送时钟从接收数据中提取的时钟为基准。

(2) 光功率及通道裕度。

在复用方式下，一般不存在光功率发送不足、接收达不到灵敏度或通道裕度不足的问题，但在实际运行期间，还需要对光功率进行测量和验证，特别是光收、发接口的饱和功率要进行检验，防止接收功率达到饱和功率，引起接收过载，从而引起保护通信告警信号的频

繁出现，降低了通道的传输性能。其方法基本与专用方式下的测量方式相同，不仅测量光收、发接口的光功率，还要测量64 kbit/s数据复用接口光功率及电平和复用设备的电平。

(3) 抗干扰屏蔽要求。

64kbit/s数据复用接口与PCM设备之间的屏蔽要求。64kbit/s数据复用接口和PCM复用设备之间传送的是电信号，容易受干扰，需要严密注意其电磁干扰的屏蔽措施。64kbit/s数据复用接口与PCM设备之间的连接屏蔽双绞线一般采用6类双屏蔽电缆(HF-P31/AA)，同时采取外屏蔽层两端接地，内屏蔽层一端接地的措施。如图4.14所示，外屏蔽层两端接地可有效降低高频段共模干扰的影响，内屏蔽层一端接地可降低低频段(50/60Hz)的容性耦合。数字复接接口设备与PCM之间的连接距离应不大于50 m。

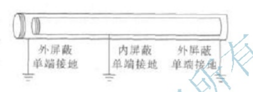


图4.14 电缆屏蔽接地示意图

(4) 匹配问题。

复用方式下，由于中间环节较多，特别是不同厂家的设备之间要进行配合，相对专用光纤方式，设备之间的匹配问题更突出。64kbit/s复用方式下的匹配问题，首先是时钟匹配，PCM设备的时钟要和通信接口的发送时钟相匹配；其次阻抗匹配，64kbit/s通信接口和PCM设备的阻抗要匹配，一般为同向型接口、120Ω平衡；还有48 V电平匹配和G.703编码匹配等。

PCM 64kbit/s复用方式主要用于长距离输电线路的保护，节省了光缆及施工费用；复用方式经济性能好，但系统中间环节多，实现复杂；设备投资费用增加一些，但光芯利用率大大提高。

3．SDH 2Mbit/s复用方式

1) SDH 2Mbit/s复用方式结构

其结构如图4.15所示。

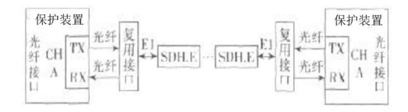


图 4.15 SDH 2Mbit/s 复用方式结构

SDH 2Mbit/s复用方式是保护装置的光收、发接口利用数字复用技术通过2Mbit/s数据复用接口与PDH/SDH设备及复用通道和对侧保护装置相连。保护装置和PDH/SDH复用设备之间的互连是由一个2Mbit/s数据复用接口实现，其采用同步通信方式，通信规约符合CCITT标准中G.703码型协议。保护装置将保护数据通过光纤传送给设在通信室中的2Mbit/s数据复用接口，然后通过PDH/SDH复用设备及复用通道和对侧保护装置相连并交换信息。

2) 通信性能影响因素

SDH 2Mbit/s复用方式与PCM 64kbit/s复用方式相似，相对64kbit/s复用方式而言，SDH 2Mbit/s复用方式减少了PCM复用设备，直接和PDH/SDH复用设备相连接，提高了通信的可靠性，具有更好的通信性能。

(1) 时钟方式。

SDH 2Mbit/s复用方式下，根据所连接的复用设备的不同，光收、发接口的数据时钟基准也不同，当复用接口连接PDH时，一般把一端保护装置的时钟方式设置为“从时钟”而另一端保护装置的时钟方式设置为“主时钟”；当复用接口连接SDH设备时，一般把两端保护装置的时钟方式都设置为“主时钟”。

(2) 光功率及通道裕度。

与PCM 64kbit/s复用方式类似，在SDH 2Mbit/s复用方式下，一般不存在光功率发送不足、接收功率达不到灵敏度或通道裕度不足的问题，但在实际运行期间，还是需要进行测量和验证，特别是光收、发接口的饱和功率要进行检验，防止接收功率达到饱和功率，降低了通道的传输性能。其方法基本与专用光纤方式下的测量方式相同，而且不仅测量光收、发接口的光功率，还要测量SDH 2Mbit/s数据复用接口光功率及电平和复用设备的电平。

(3) 抗干扰屏蔽要求。

SDH 2Mbit/s数据复用接口到PDH/SDH 设备之间用电信号传送数据，需防止电磁干扰，一般采用同轴电缆进行连接。由于同轴电缆比双绞线具有更好的电磁屏蔽性能，相对而言，SDH 2Mbit/s复用方式比PCM 64kbit/s复用方式具有更好的屏蔽性能，直接采用同轴电缆即可满足要求。数字复用接口通过同轴电缆和PDH/SDH设备相连接时，数字复用接口与SDH的距离不大于50m。

(4) 匹配问题。

与PCM 64kbit/s复用方式的匹配问题相类似，对SDH 2 Mbit/s复用方式也需要不同厂家的设备之间进行配合。SDH 2Mbit/s复用方式的匹配问题，首先是时钟匹配，PDH/SDH设备的时钟要和通信接口的发送时钟相匹配；其次阻抗匹配，SDH/PDH 设备和通信接口的电阻要匹配，一般为75Ω不平衡；此外还有48 V电平匹配和G.703编码匹配等。

SDH 2Mbit/s复用方式下，保护装置通过2Mbit/s复用接口盒直接连接到PDH/SDH设备，中间不经过PCM复用设备，减少了中间环节和传输时延，而且利用了SDH自愈环的高可靠性，提高了整个系统的可靠性；2Mbit/s速率增加了传输带宽，可以传输更多保护信息。目前，SDH 2Mbit/s 通道应用方式逐渐增多。

对于进行相量比较的电流差动保护对两端信号的同步性要求较高，且传输速率和传输容量都有较高的要求，对于长距离线路只能采用复用通道传输。目前多数电流差动保护在采样同步问题上，均采用“ 乒乓技术”进行通道传输延时的自动补偿，但前提是双向传输时延一致；而带自愈功能的复用通道，往往主通道良好，通道时延短，备通道路由可能迂回较多，时延较长。两侧采样数据不同步，造成数据帧的丢弃。因此，在设计时应考虑选用同步原理

在一定程度上适用于可变通道的保护。目前各大继电保护厂家都相继研发了双通道的电流差动保护，正常运行时，两个光纤通道的数据被分别存放在缓存区中，两通道数据互为备用，当其中一个通道中断时或数据帧丢失，可实现数据的无缝切换，这成为解决复用通道缺陷最可靠的办法。

4.5.4 光纤保护的发展趋势及应用前景

纵联保护的优势在于能够实现全线速动，而制约全线速动的因素有选相的正确性、起动元件是否足够灵敏以及收发讯机延时等；而光纤网络以其优良的传输性能、稳定性及其自适应的保护恢复能力，采用光纤通道继电保护能较好地解决这些问题。

目前，在电力网络通信领域广泛使用的是以电复用为基本工作原理的SDH/SONET同步数字体系，它具有强大的保护恢复能力和固定的时延性能。由于采用电复用来提高传输容量具有一定的局限性，尤其是在高速扩容及复杂拓扑结构的电力网络中渐渐难以满足组网的要求，因此，从目前的电复用方式转向光复用方式将是电力光纤网络的必然发展方向。

现有电力光纤网络光缆主要有3种：普通非金属光缆、自承式光缆和架空地线复合光缆(OPGW)。OPGW虽然造价较高，但在高电压等级及同杆双回和多回线路使用时，占线路综合造价比例较低，在承载远动、语音等业务的同时兼作继电保护通道，尤其是在高压线路中采用光纤保护与采用高频保护更为经济，并且具有可靠性高、维护费用低的优点。随着通信技术的发展，光缆价格日趋下降，OPGW在电力光纤网络中将成为主流形式。尽管目前光纤保护在长距离和超高压输电线路上的应用还存在一定的局限性，但是随着我国智能电网建设逐步深入和光纤网络的逐步完善，光纤保护必将占据线路保护的主导地位。

【本章小结】首先介绍了纵联保护的基本原理、实现方法及整定原则；其次介绍了高频保护实现的原理、方法及组成高频通道各元件的功能；最后介绍了光纤保护的构成及特点。

【关键词】纵联保护 Longitudinal Differential Protection ；高频通道 High-Frequency Duct； 光纤保护 Optical Fibre Protection

【阅读材料】

电力特种光缆

电力特种光缆泛指 OPGW(光纤复合地线)、 OPPC(光纤复合相线)、MASS (金属自承光缆)、ADSS(全介质自承光缆)、ADL(相/地捆绑光缆)和 GWWOP(相/地线缠绕光缆)等几种。 目前，在我国应用较多的电力特种光缆主要有 ADSS 和 OPGW。

1、 光纤复合地线——OPGW(Optical Ground Wire) OPGW 又称地线复合光缆、光纤架空地线等，是在电力传输线路的地线中含有供通信用的光纤单元。它具有两种功能：一是作为输电线路的防雷线，对输电导线抗雷闪放电提供屏蔽保护；二是通过复合在地线中的光纤来传输信息 。 OPGW 是架空地线和光缆的复合体，但并不是它们之间的简单相加。

OPGW 光缆主要在 500kV 、220kV 、110kV 电压等级线路上使用，受线路停电、安全等因素影响，多在新建线路上应用。 OPGW 的适用特点是：(1)高压超过 110kV 的线路，档距较大(一般都在 250m 以上)；(2)易于维护，对于线路跨越问题易解决，其机械特性可满足线

路大跨越；(3)OPGW 外层为金属铠装，对高压电蚀及降解无影响；(4)OPGW 在施工时必须停电，停电损失较大，所以在新建 110kV 以上高压线路中应该使用 OPGW；(5)OPGW 的性能指标中，短路电流越大，越需要用良导体做铠装，则相应降低了抗拉强度，而在抗拉强度一定的情况下，要提高短路电流容量，只有增大金属截面积，从而导致缆径和缆重增加，这样就对线路杆塔强度提出了安全问题。

常见的 OPGW 结构主要有三大类，分别是铝管型、铝骨架型和(不锈)钢管型。

2、光纤复合相线——OPPC(Optical Phase Conductor)

在电网中，有些线路可不设架空地线，但相线是必不可少的。为了满足光纤联网的要求，与 OPGW 技术相类似，在传统的相线结构中以合适的方法加入光纤，就成为光纤复合相线(OPPC)。虽然它们的结构雷同，但从设计到安装和运行，OPPC 与 OPGW 有原则的区别。

3、金属自承光缆——MASS(Metal Aerial Self Supporting)

从结构上看，MASS 与中心管单层绞线的 OPGW 相一致，如没有特殊要求，金属绞线通常用镀锌钢线，因此，结构简单，价格低廉。MASS 是介于 OPGW 和 ADSS 之间的产品。MASS 作为自承光缆应用时，主要考虑强度和弧垂以及与相邻导/地线和对地的安全间距。它不必像 OPGW 要考虑短路电流和热容量，也不需要像 OPPC 那样要考虑绝缘、载流量和阻抗，更不需要像 ADSS 要考虑安装点场强，其外层金属绞线的作用仅是容纳和保护光纤。在破断力相近的情况下，虽然 MASS 比 ADSS 重，但外直径比中心管 ADSS 约小 1/4，比层绞 ADSS 约小 1/3。在直径相近情况下，ADSS 的破断力和允许张力却要比 MASS 小得多。

4、全介质自承光缆——ADSS(All Dielectric Self Supporting)

ADSS 光缆在 220kV 、110kV 、35kV 电压等级输电线路上广泛使用，特别是在已建线路上使用较多。 它能满足电力输电线跨度大、垂度大的要求。标准的 ADSS 设计可达 144 芯。其特点是：(1)ADSS 内光纤张力理论值为零；(2)ADSS 光缆为全绝缘结构，安装及线路维护时可带电作业，这样可大大减少停电损失；(3)ADSS 的伸缩率在温差很大的范围内可保持不变，而且其在极限温度下，具有稳定的光学特性；(4)耐电蚀 ADSS 光缆可减少高压感应电场对光缆的电腐蚀；(5)ADSS 光缆直径小、质量轻，可以减少冰和风对光缆的影响，其对杆塔强度的影响也很小；(6)ADSS 采用了新型材料及光滑外形设计，使其具有优越的空气动力特性。

ADSS 光缆主要由缆芯、加强芳纶纱(或其它合适的材料)和外护套组成。各种各样的 ADSS 光缆结构可归纳为最主要的 中心管型和层绞型 2 种 。

5、附加型光缆——OPAC

无金属捆绑式架空光缆 (AD-Lash)和无金属缠绕式光缆 GWWOP(Ground Wire Wrapped Optical Fiber Cable) 光缆有时被统称为附加型光缆 ——OPAC， 是在电力线路上建设光纤通信网络的一种既经济又快捷的方式。

它们用自动捆绑机和缠绕机将光缆捆绑和缠绕在地线或相线上，其共同的优点是：光缆重量轻、造价低、安装迅速。在地线或 10 kV/35 kV 相线上可不停电安装；共同的缺点是：由于都采用了有机合成材料做外护套，因此，都不能承受线路短路时相线或地线上产生的高温，都有外护套材料老化问题，施工时都需要专用机械，在施工作业性、安全性等方面问题较多，而且其容易受到外界损害，如鸟害、枪击等，因此，在电力系统中都未能得到广泛的应用。 但在国际上，这类技术并没有被淘汰或放弃，仍在相当的范围内应用。

人类对客观事物的认识在发展，技术在不断进步，材料也在日益更新。作为电力系统通信中最富特色的电力特种光缆技术也在不断发展和完善，新的光缆结构也不断出现在我们的

面前；同时人们对特种光缆的需求也趋向多元化、高标准。可以预见，在未来相当长一段时间内，电力特种光缆将在电力通信网中继续发挥着不可替代的重要作用，图 4.16 为未来电力光纤三网合一的应用系统。



图 4.16 电力光纤三网合一系统

资料来源：通信技术，潘莹玉

习 题

4.1 填空题

1．纵联保护的通道主要有以下几种类型：_____、______ 、______ 、______。

2．线路纵联保护载波通道的构成部件包括：_____ 、______ 、______ 、_____ 、_____ 、______ 、______ 、 ______ 。

3．电力载波通道有_______ 、_______ 两种构成方式。

4．电流启动式闭锁式纵联保护跳闸的必要条件是高定值起动元件动作且正方向元件_____，反方向元件 ______，收到过闭锁信号而后信号又消失。

5．闭锁式高频方向保护在故障时启动发信，而______时停止发信。其动作跳闸的基本条件是__________ 。

6．方向高频保护是比较线路两端 ______，当满足 ______条件时，方向高频保护动作。

7．故障时发信的闭锁式方向高频保护______ 振荡影响，区内故障伴随高频通道破坏，保护______动作。

8．线路闭锁式纵联保护启动发信方式有______启动、______启动和远方启动。

9. 现代微机式高频方向保护中普遍采用正、反两个方向元件，其中反方向元件动作要比正方向元件 ______ 。

10．纵差动保护的不平衡电流实质上是______，出现不平衡电流的主要原因是______。

4.2 选择题

1．高频保护载波频率过低，如低于 50kHz，其缺点是____ 。

A. 受工频干扰大，加工设备制造困难　　B. 受高频干扰大　　C. 通道衰耗大

2. 高频阻波器能起到_____的作用。

A. 阻止高频信号由母线方向进入通道　B. 阻止工频信号进入通信设备

C. 限制短路电流水平

3. 高频通道中结合滤波器与耦合电容器共同组成带通滤波器，其在通道中的作用是______。

A. 使输电线路和高频电缆的连接成为匹配连接

B. 使输电线路和高频电缆连接成为匹配连接，同时使高频收发信机和高压线路隔离

C. 阻止高频电流流到相邻线路上去

4. 纵联保护相地制电力载波通道由 ______ 部件组成。

A. 输电线路，高频阻波器，连接滤波器，高频电缆

B. 高频电缆，连接滤波器，耦合电容器，高频阻波器，输电线路

C. 收发信机，高频电缆，连接滤波器，保护间隙，接地刀，耦合电容器，高频阻波器，输电线路

5. 能切除线路区内任一点故障的主保护是________。

A. 相间距离　　B. 纵联保护　　C. 零序电流保护

6. 闭锁式纵联保护跳闸的必要条件是：高值启动元件启动后，______。

A. 正方向元件动作，反方向元件不动作，没有收到过闭锁信号

B. 正方向元件动作，反方向元件不动作，收到闭锁信号而后信号又消失

C. 正、反方向元件均动作，没有收到过闭锁信号

D. 正方向元件不动作，收到闭锁信号而后信号又消失

7. 高频闭锁方向保护发信机起动后当判断为外部故障时______ 。

A. 两侧立即停信　　B. 两侧继续发信

C. 正方向一侧发信，反方向一侧停信　　D. 正方向一侧停信，反方向一侧继续发信

8. 纵联保护的通道异常时，其后备保护中的距离、零序电流保护应 _______。

A. 继续运行　　B. 同时停用　　C. 只允许零序电流保护运行

9. 纵联保护电力载波高频通道用______ 方式来传送被保护线路两侧的比较信号。

A. 卫星传输　　B. 微波通道　　C. 相-地高频通道　　D. 电话线路。

10. 在运行中的高频通道上进行工作时，_____ 才能进行工作。

A. 相关的高频保护停用　　B. 确认耦合电容低压侧接地绝对可靠

C. 结合滤波器二次侧短路并接地

4.3 判断题

1. 所谓相—地制通道，就是利用输电线的某一相作为高频通道加工相。　（　）

2. 高频保护采用相—地制高频通道是利用因为相—地制通道衰耗小。　（　）

3. 耦合电容器对工频电流具有很大的阻抗，可防止工频高压侵入高频收发信机。（　）

4. 在高频通道中连接滤波器与耦合电容器共同组成带通滤波器，其在通道中的作用是使输电线路和高频电缆的连接成为匹配连接，同时使高频收发信机和高压线路隔离。　（　）

5. 高频保护不反应被保护线路以外的故障，所以不能作为下一段线路的后备保护。（　）

6. 对于闭锁式高频保护，判断故障为区内故障发跳闸令的条件为本侧停信元件在动作状态及此时通道无高频信号（即收信元件在不动作状态）。　（　）

7. 对于纵联保护，在被保护范围末端发生金属性故障时，应有足够的灵敏度。　（　）

8．闭锁式纵联保护跳闸的必要条件是高值启动元件动作，正方向元件动作，反方向元件不动作，收到过闭锁信号而后信号又消失。（ ）

9. 闭锁式纵联保护在系统区外故障时靠近故障点一侧的保护将作用收发信机停信。（ ）

10．高频距离保护不受线路分布电容的影响。（ ）

4.4 问答题

1．纵联保护按通道类型可分为几种？

2．电力载波高频通道有哪几种构成方式，各有什么特点？

3．继电保护高频通道的工作方式有哪几种？

4．何谓远方发信，为什么要采用远方发信？

5．高频闭锁式和允许式保护在发信控制方面有哪些区别（以正、反向故障情况为例说明）？

6．解释允许式和闭锁式、长期发信和短期发信、相—地加工制和相—相加工制的概念。

7．为什么说高频闭锁距离保护具有高频保护和距离保护两者的优点？

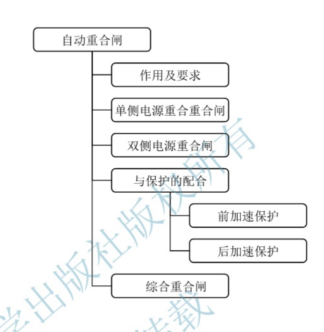
8．简述简述光纤保护的特点。

9．为什么国产高频保护装置大多采用故障时发闭锁信号的工作方式？

10．阻波器为什么要装设在隔离开关的线路侧？

第 5 章 自动重合闸

【本章知识结构图】



电力系统故障中，大多数故障是架空线路的故障。运行经验表明，架空线路故障大多是瞬时性的，为了减少对用户的停电时间，目前电力系统广泛采用自动重合闸装置来解决这一问题，该装置如何工作，通过本章学习将予以解答。

【本章教学目标与要求】

掌握单侧电源输电线路三相一次重合闸工作原理；

掌握双侧电源线路三相一次重合闸的特点和主要重合方式；

熟悉三相重合闸动作时限的整定；

熟悉自动重合闸前加速保护和后加速保护的动作配合及特点；

熟悉三相、单相重合闸在特高压输电线路应用；

了解重合闸与保护的配合和常用故障选相元件。



本章导图　750kV 输电线路

5.1 自动重合闸的作用及基本要求

5.1.1 自动重合闸的作用

电力系统运行经验表明，输电线路尤其是架空输电线路的故障发生率最高，且发生的故障大多是短时存在的，如雷击过电压引起的绝缘子表面闪络、树枝落在导线上引起的短路、大风时的短时碰线、通过鸟类的身体放电等。发生此类故障时，继电保护若能迅速使断路器跳开电源，故障点电弧即可自行熄灭，绝缘强度重新恢复，原来引起故障的树枝、鸟类等也被电弧烧掉而消失。这时若重新合上断路器，往往能恢复供电。因此，常称这类故障为瞬时性故障。此外，输电线路上也可能发生由于倒杆、断线、绝缘子击穿等引起的长时间存在的故障，即永久性故障，这类故障被继电保护切除后，如重新合上断路器，由于故障依然存在，线路还要被继电保护装置切除，因而就不能恢复正常的供电。

统计资料表明，输电线路的瞬时性故障为其故障主要形式，约占总故障次数的 80%~90%以上。因此，对于瞬时性故障，断路器断开后再重合一次就能恢复供电，从而可减少停电时间，提高供电的可靠性。重新合上断路器的工作可由运行人员手动操作进行，但手动操作造成的停电时间太长，用户电动机多数可能已经停止运行。为此，在电力系统中广泛采用了将被切除线路断路器重新自动投入的一种自动装置，即自动重合闸（简称 AR）。

当输电线路发生故障时，在重新合闸前，自动重合闸装置本身并不能判断故障是瞬时性的还是永久性的，因此，在重合之后，若重合于瞬时性故障则重合成功，恢复三相线路的继续供电；若重合于永久性故障则重合不成功，保护再次动作，断路器再次切除故障线路。一段时间内重合成功的次数与总动作次数之比称为重合闸的成功率。根据运行资料统计，输电线路自动重合闸成功率，在 60%～90%之间。如果在重合之前先判断是瞬时性故障还是永久性故障，实现瞬时性故障时重合而永久性故障时闭锁重合闸，则可大大提高重合闸的成功率。但目前，具有永久性故障识别能力的重合闸装置的尚处在理论研究阶段，如何在重合前可靠永久性故障识别依旧是研究难点，距离电力工业现场实用尚需时日。

在输电线路上采用自动重合闸具有以下作用：

（1）在输电线路发生瞬时性故障时能迅速恢复供电，从而提高供电的可靠性；对于单侧电源网络的单回线尤为显著；

（2）对于双侧电源输电线路，可以提高系统并列运行的稳定性，从而提高输送容量；

（3）可以纠正由于断路器本身机构的问题或继电保护误动作引起的误跳闸。

5.1.2 采用自动重合闸的不利影响

采用自动重合闸后，在带来可观效益的同时，亦存在重合于永久性故障时带来一些不利影响，如：

（1）电力系统将再次受到短路电流的冲击，对超高压系统还可能降低并列运行的稳定性， 可能引起系统振荡；

（2）严重恶化了断路器的工作条件，在短时间内连续两次切断短路电流。这种情况对于油断路器必须予以考虑，因为第一次跳闸时，由于电弧的作用，已使绝缘介质的绝缘强度降低，在重合后第二次跳闸时，是在绝缘强度已经降低的不利条件下进行的，因此，油断路器在采用了重合闸以后，其遮断容量也要不同程度的降低（一般降低到 80%左右）。

对于重合闸的经济效益，应该用无重合闸时，因停电而造成的国民经济损失来衡量。由于重合闸装置本身的投资很低，工作可靠，因此，在电力系统中获得广泛的应用。

5.1.3 装设重合闸的规定

（1）在 1kV 及以上的架空线路或电缆与架空线的混合线路，在具有断路器的条件下，如用电设备允许且无备用电源自动投入时，一般都应装设自动重合闸装置；

(2）旁路断路器和兼作旁路的母联断路器或分段断路器，应装设自动重合闸装置；

(3）低压侧不带电源的降压变压器，可装设自动重合闸装置；

(4）必要时，母线故障可采用母线自动重合闸装置。

5.1.4 对自动重合闸的基本要求

1．动作迅速

为了尽可能缩短停电对用户造成的损失，要求自动重合闸装置动作时间越短越好。但必须保证在重合前，保护装置复归、故障点去游离后周围介质绝缘强度的恢复、断路器灭弧能力的恢复与传动机构的复归及准备再次动作所需的时间。通常重合闸的动作时间，一般采用 0.5~1.5s。

2．在下列情况下自动重合闸装置不应动作

（1）由运行人员手动操作或通过遥控装置将断路器断开时，自动重合闸装置不应动作。

（2）断路器手动合闸于故障线路，而随即被继电保护跳开时，自动重合闸装置不应动作。因为在这种情况下，故障多属于永久性故障。再合一次也不可能成功。

（3) 当断路器处于不正常状态时（如操动机构中使用的气压、液压异常等）。

3．动作的次数应符合预先的规定

不允许自动重合闸装置任意多次重合，其动作的次数应符合预先的规定。如一次重合闸就只能重合一次，当重合于永久性故障而断路器再次跳闸后，就不应再重合。在任何情况下，例如装置本身的元件损坏，继电器触点粘住或拒动等，都不应使断路器错误的多次重合到永久性故障上去。因为如果重合闸多次重合于永久性故障，将使系统多次遭受短路冲击，同时还可能损坏断路器，可能导致断路器爆炸的严重事故。

4．具有自动复归功能

自动重合闸装置成功动作一次后应能自动复归，为下一次动作做好准备。对于 10kV 及以下电压的线路，如有人值班时，也可采用手动复归方式。对于雷击机会较多的线路是非常有必要的。

5．重合闸时间应能整定

重合闸时间应能整定，并有可能在重合闸以前或重合闸以后加速继电保护的动作，以

便更好地与继电保护相配合，加速故障地切除。

6．用不对应原则启动

一般自动重合闸可采用控制开关位置与断路器位置不对应原则启动重合闸装置，即当控制开关在合闸位置而断路器实际上在断开位置地情况下，使重合闸启动，这样就可以保证不论是什么原因使断路器跳闸后，都可以进行一次重合。对于综合自动重合闸，宜采用不对应原则和保护同时启动。

5.1.5 自动重合闸的类型

采用重合闸的目的有两点：其一是保证并列运行系统的稳定性；其二是尽快恢复瞬时故障元件的供电，从而自动恢复整个系统的正常运行。

按照自动重合闸装置作用于断路器的方式可分为以下三种类型。

1．三相重合闸

三相重合闸是指不论线路上发生的是单相短路还是相间短路，继电保护装置动作后均使断路器三相同时断开，然后重合闸再将断路器三相同时投入的方式。当前一般只允许重合闸动作一次，故称为三相一次自动重合闸装置。

2．单相重合闸

在220kV及以上超/特高压电力系统中，由于架空线路的的线间距离大，相间故障的机会很少，而绝大多数是单相接地故障。因此，在发生单相接地故障时，只把故障相断开，然后再进行单相重合，而未发生故障的两相仍然继续运行，就能够大大提高供电的可靠性和系统并列运行的稳定性。这种重合闸方式就叫单相重合闸。如果是永久性故障，单相重合不成功，且系统又不允许非全相长期运行，则重合后，保护动作使三相断路器跳闸不再进行重合。

3．综合重合闸

综合重合闸是将单相重合闸和三相重合闸综合到一起，当发生单相接地故障时，采用单相重合闸方式工作；当发生相间短路时，采用三相重合闸方式工作。综合考虑这两种重合闸方式的装置称为综合重合闸装置。

根据重合闸控制的断路器所接通或断开的元件不同，可将重合闸分为线路重合闸、变压器重合闸和母线重合闸等。目前在10kV及以上架空线路和电缆与架空线路的混合线路上，广泛采用重合闸装置，只有在个别由于系统条件的限制，不能使用重合闸。例如，断路器遮断容量不足；防止出现非同期情况或者防止在特大型汽轮发电机出口重合于永久性故障时产生更大的扭转力矩而对轴系造成损坏等。鉴于单母线或双母线的变电所在母线故障时会造成全停或部分停电的严重后果，有必要在枢纽变电所装设母线重合闸。根据系统的运行条件，事先安排哪些元件重合、哪些元件不重合、哪些元件在符合一定条件时才重合；如果母线上的线路及变压器都装设有三相重合闸，使用母线重合闸不需要增加设备与回路，只是在母线保护动作时不去闭锁那些预计重合的线路和变压器，实现比较简单。变压器内部故障多数是永久性故障，因而当变压器的瓦斯保护和差动保护动作后不重合，仅当后备保护动作时才启动重合闸。

根据重合闸控制断路器连续合闸次数的不同，可将重合闸分为一次重合闸和多次重合闸。一次重合闸主要用于输电线路，以提高系统的稳定性。多次重合闸一般用于配电网中，亦称重合器，重合器与分段器配合，自动隔离故障区段，是配电自动化的重要组成部分。

对一个具体的线路，究竟使用何种重合闸方式，要结合系统的稳定性分析，选取对系统稳定最有利的重合方式。一般遵循下列原则：

（1）一般没有特殊要求的单电源线路，宜采用一般的三相重合闸；

（2）凡是选用简单的三相重合闸能满足要求的线路，都应选用三相重合闸；

（3）当发生单相接地短路时，如果使用三相重合闸不能满足稳定性要求而出现大面积停电或重要用户停电者，应当选用单相重合闸和综合重合闸。

由北京四方继保自动化公司生产的微机型自动重合闸装置如图 5.1 所示。



图 5.1 微机型自动重合闸装置

5.2 单侧电源输电线路的三相一次自动重合闸

单侧电源线路只有一侧电源供电，不存在非同步合闸问题，自动重合闸装在线路的送电侧。在我国电力系统中，单侧电源网络广泛采用三相一次自动重合闸。当输电线路上不论发生单相接地短路还是相间短路，继电保护装置均将线路三相断路器断开，然后自动重合闸装置启动，经预定延时（一般为 0.5～1.5s）发出重合脉冲，将三相断路器同时合上。若故障为瞬时性的，则重合成功，线路继续运行；若故障为永久性的，则继电保护再次将三相断路器断开，不再重合。其工作流程如图 5.2 所示。

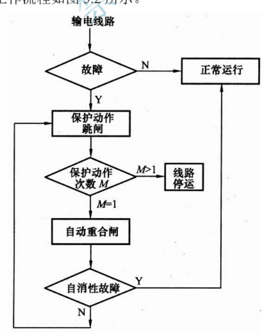


图 5.2 单侧电源线路的三相一次重合闸工作流程

单侧电源线路的三相一次自动重合闸由于下列原因，使其实现较为简单：

（1）不需要考虑电源间同步检查问题；

(2) 三相同时跳开，重合不需要区分故障类别和选择故障相；

(3) 只需要断路器满足允许重合的条件下，经预定的延时，发出一次合闸脉冲。

这种重合闸的实现元件有电磁型、晶体管型、集成电路型及微机型等，它们的工作原理是相同的，只是实现的方法不同。图 5.3 所示为单侧电源送电线路三相一次重合闸的工作原理框图，其主要由重合闸启动、重合闸时间、一次合闸脉冲、手动跳闸闭锁、手动合闸于故障时保护加速跳闸等元件组成。

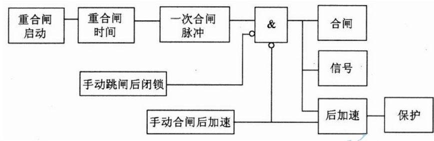


图 5.3 三相一次重合闸工作原理框图

重合闸启动：当断路器由继电保护动作跳闸或其他非手动原因而跳闸后，重合闸均应启动。一般使用断路器的辅助常闭触点或者用合闸位置继电器的触点构成，在正常情况下，当断路器由合闸位置变为分闸位置时，立即发出启动指令。

重合闸时间：启动元件发出启动指令后，时间元件开始记时，达到预定的延时后，发出一个短暂的合闸命令。这个延时即重合闸时间，可以对其整定。

一次合闸脉冲：当延时时间到后，它立即发出一个可以合闸的脉冲命令，并且开始记时，准备重合闸的整组复归，复归时间一般为 15~25s。在这个时间内，即使再有重合闸时间元件发出命令，它也不再发出可以合闸的第二次命令。此元件的作用是保证在一次跳闸后有足够的时间合上（瞬时性故障）和再次跳开（对永久性故障）断路器，而不会出现多次重合。

手动跳闸闭锁：当手动跳开断路器时，也会启动重合闸回路，为消除这种情况造成的不必要合闸，常设置闭锁环节，使其不能形成合闸命令。

重合闸后加速保护跳闸回路：对于永久性故障，在保证选择性的前提下，尽可能地加快故障的再次切除，需要保护与重合闸配合。当手动合闸到带故障地线路上时，保护跳闸，故障一般是因为检修时的保安接地线未拆除、缺陷未修复等永久性故障，不仅不需要重合，而且还要加速保护的再次跳闸。

5.3 双侧电源线路的三相一次自动重合闸

5.3.1 双侧电源线路自动重合闸的特点

在两端均有电源的输电线路采用自动重合闸装置时，除应满足在 5.1 节中提出的各项要求外，还应考虑下述因素。

1．动作时间的配合问题

当线路上发生故障时，两侧的继电保护可能以不同的时限动作于跳闸，即两侧断路器不同步跳闸。例如，在靠近线路一侧发生短路时，本侧继电保护属于第 I 段动作范围，保护会无延时跳闸；而另一侧则属于第 II 段动作范围，保护带延时跳闸，为了保证故障点电弧的熄灭和绝缘强度的恢复，以使重合闸成功，线路两侧的重合闸必须保证两侧的断路器均已断开后，才能将本侧断路器进行重合。

2．同期问题

当线路上发生故障两侧断路器跳闸以后，线路两侧电源的电动势之间夹角摆开，有可能失步。后合闸的一侧重合时应考虑两侧电源是否同步以及是否允许非同步合闸的问题。

因此，双电源线路上的重合闸，应根据电网的接线方式和运行情况，在单侧电源重合闸的基础上，采取一些附加措施，以适应新的要求。

双侧电源线路的重合闸方式很多，但可以归纳为如下两类：第一类是不检定同期的重合闸，如快速重合闸、非同期重合闸、解列重合闸及自同期重合闸等。第二类是检定同期重合闸，如检定无压和检定同期的三相一次重合闸及检平行线路有电流的重合闸等。

5.3.2 双侧电源线路自动重合闸的主要方式

近年来，双侧电源线路的重合闸出现了很多新的方式，保证了重合闸具有显著的效果，现将主要方式分述如下。

1. 三相快速自动重合闸

三相快速自动重合闸指的是当输电线路发生故障时，继电保护快速断开两侧断路器后能够快速重合。采用三相快速自动重合闸必须满足以下条件：

（1）线路两侧装设能够快速切除线路任意一点故障的全线速动保护装置，如纵联保护等；

（2）线路两侧装设快速动作的断路器，如快速气体断路器；

（3）两侧断路器重合瞬间所产生的冲击电流对系统和设备的冲击均在安全范围之内。

具备以上条件后，可以保证在故障后到合闸前 0.5~0.6s 内的时间内，两侧电源电势角差不大，系统不会失步；即使是两侧的电势角差较大，但重合周期短，断路器重合后很快拉入同步。显然，三相快速重合闸具有快速重合的特点，能够提高系统并列运行的稳定性和供电的可靠性，所以在 220kV 以上的线路应用较多。

2. 非同期重合闸

当重合闸的重合速度不够快，或者系统的功角摆开比较快，两侧断路器合闸时系统已经失步，合闸后期待系统自动拉入同步，此时系统中各电力元件将受到冲击电流的影响，当冲击电流在允许值之内时，可采取非同期合闸方式；否则，不允许采取该方式。

3. 解列重合闸

在如图 5.4 所示，双侧电源的单回线上，当不能采用非同步重合闸时，小电源侧采用双母线联络方式向重要负荷和非重要负荷供电。正常时由系统向小电源侧输送功率，当线路发生故障后，系统侧的保护动作使线路断路器跳闸，小电源侧的保护动作使解列点跳闸，而不跳故障线路的断路器，小电源与系统解列后，其容量应基本上与所带的重要负荷相平衡，保证地区重要负荷的连续供电。在两侧断路器跳闸后，系统侧的重合闸检查线路无电压，在确证对侧已跳闸后进行重合，如重合成功，则由系统恢复对地区非重要负荷的供电，然后，再在解列点处进行同步并列，即可恢复正常运行。如果重合不成功，则系统侧的保护再次动作跳闸，地区的非重要负荷被迫中断供电。

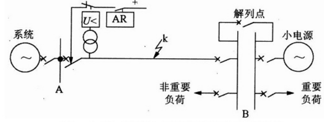


图 5.4 单回线路上采用解列重合闸示意图

解列点的选取原则是，尽量使发电厂的容量与其所带的负荷接近平衡，这是该种重合

闸发生所必须考虑并加以解决的问题。

4. 自同期重合闸

如图 5.5 所示的水电厂与系统的网络接线，在水电厂如条件许可时，可以采用自同步重合闸。线路上 k 点方式故障后，系统侧的保护使线路断路器跳闸，水电厂侧的保护则动作于跳开发电机的断路器和灭磁开关，而不跳开故障线路的断路器。然后系统侧的重合闸检查线路无电压而重合，如重合成功，则水轮发动机以自同步的方式自动与系统并列，因此称为自同步重合闸。如重合不成功，则系统侧的保护再次动作跳闸，水电厂也被迫停机。

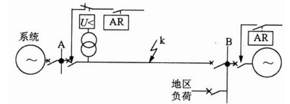


图 5.5 在水电厂采用自同步重合闸示意图

采用自同步重合闸时，必须考虑对水电厂侧地区负荷供电的影响，因为在自同步重合闸的过程中，如果不采取其他措施，它将被迫全部停电。当水电厂有两台以上的机组时，为了保证对地区负荷的供电，则应考虑使一部分机组与系统解列，继续向地区负荷供电，另一部分机组实行自同步重合闸。

5. 检同期重合闸

当必须满足同期条件才能合闸时，需要使用检同期重合闸。因为检同期比较复杂，根据发电厂出线或输电断面上的输电线的电流间的关系，有时候可以实现简单的检测系统是否同步。检同步重合包括以下几种情况：

(1) 系统联系紧密，保证两侧不会失步。并列运行的发电厂或电力系统之间，在电气上有紧密联系时，由于同时断开所有联系的可能性几乎不存在，因此，当任一条线路断开之后，又进行重合闸时，都不会出现非同步合闸的问题，在这种情况下，可以采用不检查同步的自动重合闸。

（2）在双回线上检查另外一回线有电流的重合方式。当不能采用非同步合闸时，可采用检测另一回线路是否有电流的重合闸。当另一回线有电流时，表明系统两侧电源保持联系，一般是同步的，因此可以重合。采用这种重合方式的优点是因为电流检定比同步检定简单。如图 5.6 所示。

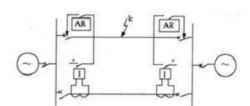


图 5.6 双回线上采用检查另一回线有无电流的重合闸示意图

（3）必须检定两侧电源同步后才能重合。并列运行的发电厂或电力系统之间，在电气上联系较弱时，当非同步合闸的最大冲击电流超过允许值时（按 $\delta = 180^0$，所有同步发电机的电势 $E = 1.05U_{NG}$ 计算），则不允许非同步合闸，此时必须检定两侧电源确实同步后，才能进行重合，为此可在线路的一侧采用检查线路无电压，而在另一侧采用检定同步的重合闸，如图 5.7 所示。

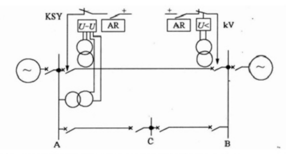


图 5.7 具有同步和无电压检定的重合闸示意图

U-U－同步检定继电器；U＜－无电源检定继电器；AR－自动重合闸装置

当上述各种方式的重合闸难于实现，而同步检定重合闸确有一定效果时，如当两个电源与两侧所带负荷各自接近平衡，因而，在单回联络线路上交换的功率较小，或者当线路断开后，每个电源侧都有一定的备用容量可供调节时，则可采用同步检定和无压检定的重合闸。

6. 220～500kV 线路重合闸方式

对 220kV 线路，满足上述有关采用三相重合闸方式的规定时，可装设三相重合闸装置，否则装设综合重合闸装置，330～500kV 线路一般情况下应装设综合重合闸装置。

5.4 具有同步检定和无电压检定的重合闸

在没有条件或不允许采用三相快速重合闸、非同期重合闸的双电源或弱联系的环并线上，可考虑采用检定无压和检定同期三相自动重合闸。这种重合闸方式的特点是：当线路两侧断路器断开后，其中一侧先检定线路无电压而重合，称为无压侧；另一侧在无压侧重合成功后，检定线路两侧电源满足同期条件后才允许进行重合，称为同步合闸。显然，该重合闸方式不会产生危及设备安全的冲击电流，亦不会引起系统振荡，合闸后能很快拉入同步。

具有同步检定和无电压检定的重合闸工作流程如图 5.8 所示。

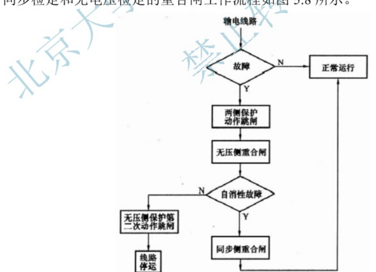


图 5.8 检定无压和检定同期三相一次自动重合闸的工作流程

具有同步检定和无电压检定的重合闸工作示意图如图 5.7 所示。该重合方式除在线路两侧均装设重合闸装置外，在线路的一侧还装设有检定线路无电压的继电器 KV，而在另一侧装设检定同步的继电器 KSY。

当线路发生故障，两侧断路器跳闸后，检定线路无电压一侧的重合闸首先动作，使断路器投入。如果重合不成功，则断路器再次跳闸。此时，由于线路另一侧无电压，同步检定继电器不动作，因此，该侧重合闸不起动。如果重合成功，则另一侧在检定同步之后，再投入断路器，线路即恢复正常工作。由此可见，在检定线路无电压一侧的断路器如果重合不成

功，就要连续两次切断短路电流，因此，该断路器的工作条件就要比同步检定一侧断路器的工作条件恶劣。为了解决这一问题，通常在每一侧都装设同步检定和无电压检定的继电器，利用连片进行切换，使两侧断路器轮换使用每种检定方式的重合闸，因而使两侧断路器工作的条件接近相同。

在使用检查线路无电压方式的重合闸一侧，当其断路器在正常运行情况下，由于某种原因 （如误碰跳闸机构、保护误动等）而跳闸时，由于对侧并未动作，因此，线路上有电压，因而就不能实现重合，这是一个很大的缺陷，为了解决这个问题，通常都是在检定无电压的一侧也同时投入同步检定继电器，两者的触点并联工作。此时如遇有上述情况，则同步检定继电器就能够起作用，当符合同步条件时，即可将误跳闸的断路器重新合上。但是，在使用同步检定的另一侧，其无电压检定是绝对不允许同时投入的。

综合以上分析，这种重合闸方式的配置原则如图 5.9 所示，一侧投入无电压检定和同步检定（两者并联工作），而另一侧只投入同步检定。两侧的投入方式可以利用其中的切换片定期轮换。

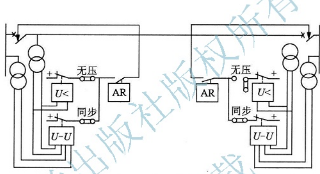


图 5.9 采用同步检定和无电压检定重合闸的配置关系

在重合闸中所用的无电压检定继电器就是普通的低电压继电器，其整定值的选择应保证只当对侧断路器确实跳闸后，才允许重合闸动作，根据经验，通常都整定为 0.5 倍额定电压。同步检定继电器采用两组线圈，分别接入同名相的母线侧和线路侧电压，利用电磁感应原理即可简单实现。

为了检定线路无电压和检定同步，就需要在断路器断开的情况下，测量线路侧电压的大小和相位，这样就需要在线路侧装设电压互感器或特殊的电压抽取装置，在高压线路上，为了装设重合闸而增设电压互感器是十分不经济的，因此，一般都是利用结合电容器或断路器的电容式套管等来抽取电压。

5.5 重合闸动作时限的选择原则

现在电力系统广泛使用的重合闸都具备永久性故障识别能力，都是经固定时限后自动重合。对于瞬时性故障，必须等待故障点消除、绝缘强度恢复后才有可能重合成功，而这个时间与湿度、风速等有关。对于永久性故障，除考虑上述时间外，还要考虑重合到永久故障后断路器内部的油压、气压恢复以及绝缘介质绝缘强度的恢复等，保证断路器能够再次切断短路电流。按以上原则确定的最小时间称为最小合闸时间，实际使用的重合闸时间必须大于这个时间，根据重合闸在系统中的主要作用计算确定。

5.5.1 单侧电源线路的三相重合闸

单侧电源线路重合闸的主要作用是尽可能缩短停电时间，重合闸的动作时限原则上应该愈短愈好，应按最小重合闸时间整定。因为电源中断后，电动机的转速急剧下降，电动机被其负荷转矩所制动，当重合闸成功恢复供电后，很多电动机要自启动，断电时间愈长，电

动机转速降得愈低，自启动电流愈大，往往又会引起电网内部电压的降低，因而造成自启动困难或延长了恢复正常工作的时间。

重合闸的最小时间按下述原则确定：

（1）在断路器跳闸后负荷电动机向故障点反馈电流的时间；故障点的电弧熄灭并使周围介质恢复绝缘强度所需要的时间；

（2）在断路器跳闸熄弧后，其触头周围绝缘强度的恢复以及灭弧室重新充满油、气需要的时间，同时其操动机构恢复原状准备好再次动作需要的时间。

（3）如果重合闸是利用继电保护跳闸出口起动，其动作时限还应加上断路器跳闸时间。

根据我国一些电力系统的运行经验，上述时间整定为 0.3～0.4s 似嫌太小，重合时多数瞬时性故障电弧未完全熄灭，以致重合成功率较低，因而采用 0.5s~1.5s 左右较为适宜。

5.5.2 双侧电源线路的三相重合闸

其时限除满足以上要求外，还应考虑线路两侧继电保护以不同时限切除故障的可能性。从最不利的情况出发，每一侧的重合闸都应该以本侧先跳闸而对侧后跳闸来作为考虑整定时间的依据。如图 5.10 所示，设本侧保护（保护 1）的动作时间为 $t_{PD.1}$，断路器的动作

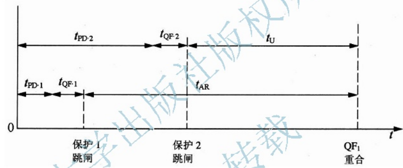


图 5. 10 双侧电源线路重合闸动作时限配合示意图

时间为 $t_{QF.1}$，对侧保护(保护 2)的动作时间为 $t_{PD.2}$，断路器的动作时间为 $t_{QF.2}$，则在本侧跳闸后，还需要经过（$t_{PD.2}+t_{QF.2}-t_{PD.1}-t_{QF.1}$）的时间才能跳闸。再考虑故障点灭弧和周围介质去游离的时间 t_U，则先跳闸一侧重合闸的动作时限应整定为：

$$t_{AR}=t_{PD.2}+t_{QF.2}-t_{PD.1}-t_{QF.1}+t_U \tag{5-1}$$

当线路上装设三段式电流或距离保护时，$t_{PD.1}$ 应采用本侧 I 段保护的动作时间，而 $t_{PD.2}$ 一般采用对侧 II 段(或III段)保护的动作时间。当线路装设纵联保护时，一般应考虑一端装设快速辅助保护动作（如电流 I、距离 I 段）时间（约 30ms），另一侧由纵联保护跳闸（可能慢至 100~120ms）。

5. 6 自动重合闸装置与继电保护的配合

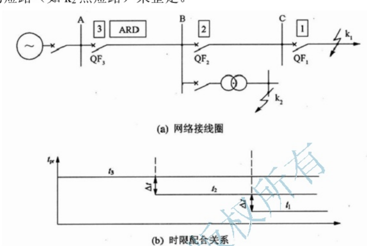
在电力系统中，重合闸与继电保护的关系极为密切。为了尽可能利用自动重合闸所提供的条件以加速切除故障，继电保护与之配合时，一般采用重合闸前加速保护和重合闸后加速保护两种方式，根据不同的线路及保护配置加以选用。

5.6.1 自动重合闸前加速保护

重合闸前加速保护一般又简称“前加速”。

如图 5.11 所示的网络接线中，假设每条线路上均装设过电流保护，其动作时限按阶梯形原则配合。因而，在靠近电源端保护 3 处的动作时限最长。为了加速故障的切除，可在保护 3 处采用自动重合闸前加速保护动作方式，即当任一线路发生故障时（如图中的 k1 点），

第一次都是由保护 3 瞬时动作予以切除，重合以后保护第二次动作切除故障是有选择性的。例如故障线路 A-B 以外（如 k1 点故障），则保护 3 的第一次动作是无选择性的，但断路器 QF3 跳闸后，如果此时的故障是瞬时性的，则在重合闸以后就恢复了供电；如果故障是永久性的，则保护 3 第二次就按有选择性的时限 t_3 动作。为了使无选择性的动作范围不扩展的太长，一般规定当变压器低压侧短路时，保护 3 不应动作。因此，其启动电流还应按躲过相邻变压器低压侧的短路（如 k_2 点短路）来整定。



5.11 自动重合闸装置前加速保护动作原理图

采用“前加速”的优点如下：

（1）能快速切除瞬时性故障；

（2）可能使瞬时性故障来不及发展成为永久性故障，从而提高重合闸的成功率；

（3）能保证发电厂和重要变电站的母线电压在 0.6～0.7 倍额定电压以上，从而保证厂用电和重要用户的电能质量；

（4）使用设备少，只需在靠近电源侧的保护加装一套自动重合闸装置，简单、经济。

其缺点是：

（1）断路器工作条件恶劣，动作次数较多；

（2）重合于永久性故障时，再次切除故障的时间会延长；

（3）若重合闸装置或 QF_3 拒动，则将扩大停电范围，甚至在最末一级线路上故障时，都会使连接在这条线路上的所有用户停电。

因此，“前加速”方式主要用于 35kV 以下由发电厂或重要变电所引出的直配线路上，以便快速切除故障，保证母线电压。

5.6.2 重合闸后加速保护

重合闸后加速保护一般又简称为“后加速”。

所谓后加速就是当线路第一次故障时，保护有选择性动作，然后进行重合。如果重合于永久性故障，则在断路器合闸后，再加速保护动作，瞬时切除故障，而与第一次动作是否带有时限无关。

采用后加速的优点是：

（1）第一次跳闸是有选择性的，不会扩大停电范围，特别是在重要的高压电网中，一般不允许保护无选择性的动作，而后以重合闸来纠正（前加速的方式）；

（2）保证了永久性故障能瞬时切除，并仍然具有选择性；

（3）和前加速保护相比，使用中不受网络结构和负荷条件的限制，一般来说是有利而无害的。

采用后加速的缺点是：

（1）第一次切除故障可能带时限；

（2）每个断路器上都需要装设一套重合闸，与前加速相比较为复杂。

利用图 5.3 后加速元件 KCP 所提供的常开触点实现重合闸后加速过电流保护的原理接线如图 5.12 所示。

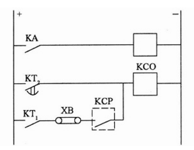


图 5.12　重合闸后加速过电流保护原理接线图

图中 KA 为过电流继电器的触点，当线路发生故障时，它起动时间继电器 KT1，然后经整定时限后 KT2 触点闭合，起动出口继电器 KCO 而跳闸。当重合闸起动以后，后加速元件 KCP 的触点将闭合 1s 的时间，如果重合于永久性故障上，则 KA 再次动作，此时即可由时间继电器 KT1 的瞬时常开触点 KT1、连片 XB 和 KCP 的触点串联而立即起动 KCO 动作于跳闸，从而实现了重合闸后过电流保护加速动作的要求。

“后加速”的配合方式广泛应用于 35kV 以上的网络及对重要负荷供电的送电线路上。因为在这些线路上一般都装有性能比较完善的保护装置，如三段式电流保护、距离保护等，因此，第一次有选择性的切除故障的时间（瞬时动作或具有 0.3～0.5s 的延时）均为系统运行所允许，而在重合闸以后加速保护的动作（一般是加速保护 II 段的动作，有时也可以加速保护III段的动作），就可以更快地切除永久性故障。

目前现场使用的微机型加速保护装置如图 5.13 所示。



图 5.13 微机型加速保护装置

5.7　单相自动重合闸

以上所讨论的自动重合闸均是三相式的，即不论送电线路上发生单相接地短路还是相间短路，继电保护动作后均使断路器三相断开，然后重合闸再将三相断路器合上。但是运行经验表明，在 220～500kV 的架空线路上，由于相间绝缘距离大，其绝大部分短路故障都是单相接地短路，在这种情况下，如果只断开故障的一相，而未发生故障的两相仍然继续运行，保证了短时间内系统两侧仍旧是同步的，然后再进行单相重合，就能大大提高供电的可靠性和系统并列运行的稳定性。如果线路发生的是瞬时性故障，则单相重合成功，即恢复三相的

正常运行。如果是永久性故障，单相重合不成功，则需要根据系统的具体情况，如不允许长期非全相运行时，即应切除三相并不再进行重合；如需要转入非全相运行时，则应再次切除单相并不再进行重合。目前一般都是采用重合不成功时跳开三相的方式。这种单相短路跳开故障单相，经一定时间重合单相，若不成功再跳开三相的重合方式称为单相自动重合闸。

电网采用单相重合闸时，不仅要求系统中装有按相操作的断路器；而且需要保护装置必须有故障选相元件。其次，进行单相重合的过程中会出现短时间的非全相运行状态，对保护如零序电流保护的动作会产生影响。另外，非全相运行状态下，电网中两健全相提供的潜供电流会影响断开相的故障点熄弧。这些都是应用单相自动重合闸要考虑的问题。

5.7.1 单相自动重合闸与保护的配合关系

通常继电保护装置只判断故障发生在保护区内、区外，决定是否跳闸，而决定跳三相还是跳单相、跳哪一相，是由重合闸内的故障判别元件和故障选相元件来完成的，最后由重合闸操作机构发出跳、合断路器的命令。

图 5.14 所示为保护装置、选相元件与重合闸回路的配合框图。

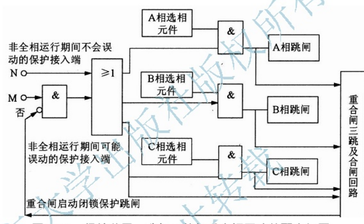


图 5.14　保护装置、选相元件与重合闸回路的配合框图

保护装置和选相元件动作后，经“与”门进行单相跳闸，并同时启动重合闸回路。对于单相接地故障，就进行单相跳闸和单相重合。对于相间短路则在保护和选相元件相配合进行判断之后，跳开三相，然后进行三相重合闸或不进行重合闸。

在单相重合闸过程中，由于出现纵向不对称，因此，将产生负序分量和零序分量，这就可能引起本线路保护以及系统中其他保护的误动作。对于可能误动作的保护，应整定保护的动作时限大于单相非全相运行的时间，以防误动，或在单相重合闸动作时将该保护予以闭锁。为了实现对误动作保护的闭锁，在单相重合闸与继电保护相连接的输入端都设有两个端子，一个端子接入在非全相运行中仍然能继续工作的保护，习惯上称为 N 端子；另一个端子则接入非全相运行中可能动作的保护，称为 M 端子。在重合闸启动以后，利用“否”回路即可将接入 M 端的保护跳闸回路闭锁。当断路器被重合而恢复全相运行时，这些保护也立即恢复工作。

5.7.2　单相自动重合闸的特点

1．故障选相元件

为实现单相重合闸，首先须有故障选相元件。对选相元件的基本要求有：

（1）选择性.

即选相元件与继电保护相配合只跳开发生故障的一相，而接于另外两相上的选相元件不应动作。

（2）灵敏性。

在故障相末端发生单相接地短路时，接于该相上的选相元件应保证足够的灵敏性。根据网络接线和运行的特点，满足以上要求的常用选相元件有如下几种。

（1）电流选相元件。

在每相上装设一个过流电继电器，其启动电流按照大于最大负荷电流的原则进行整定，以保证动作的选择性。这种选相元件适于装设在电源端，且短路电流比较大的情况，它是根据故障相短路电流增大的原理而动作的。

（2）低电压选相元件。

用三个低电压继电器分别接于三相的相电压上，低电压继电器是根据故障相电压降低的原理而动作。它的启动电压应小于正常运行时以及非全相运行时可能出现的最低电压。这种选相元件一般适于装设在小电源侧或单侧电源线路的受电侧，作为电流选相元件的后备。

（1）阻抗选相元件。

根据故障相测量阻抗降低的原理而动作。采用相地环接地方式的三个阻抗继电器以保证单相接地故障时故障相阻抗继电器测量阻抗与短路点到保护安装地点之间的正序阻抗成正比。阻抗继电器的特性一般采用方向阻抗继电器或四边形阻抗继电器。

（2）相电流差突变量选相元件。

利用故障时电气量发生突变的原理构成，三个相电流突变量继电器所反应的电流分别为：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\dot{I}_{ab} = \mathrm{d}\dot{I}_{a} - \mathrm{d}\dot{I}_{b} \\ \mathrm{d}\dot{I}_{bc} = \mathrm{d}\dot{I}_{b} - \mathrm{d}\dot{I}_{c} \\ \mathrm{d}\dot{I}_{ca} = \mathrm{d}\dot{I}_{c} - \mathrm{d}\dot{I}_{a} \end{cases} \tag{5-2}$$

在正常运行时以及短路后稳态情况下，每相电流均没变化，因此，三个选相元件均不动作。仅在故障后初瞬间，故障相电流发生突变，此时对应的故障相的相电流差突变量的选相元件动作。

2．动作时限的选择

当采用单相重合闸时，其动作时限的选择除应满足三相重合闸时所提出的要求（即大于故障点灭弧时间及周围介质去游离的时间，大于断路器及其操动机构复归原状准备好再次动作的时间）外，还应考虑下列问题：

（1）不论是单侧电源还是双侧电源，均应考虑两侧选相元件与继电保护以不同时限切除故障的可能性；

（2）当故障相线路自两侧切除后，潜供电流对灭弧所产生的影响如图 5.15 所示。

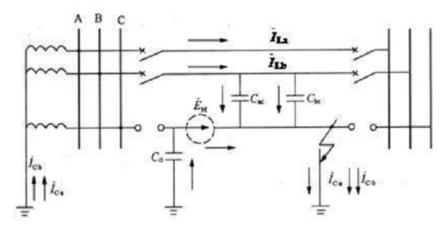


图 5.15　C 相单相接地时，潜供电流的示意图

由于非故障相与断开相之间存在有静电耦合（通过电容）和电磁耦合（通过互感）的联系，因此，虽然短路电流已被切断，但在故障点的弧光通道中，仍然流有如下的耦合感应电流：

（1）非故障相 A 通过 A、C 相间的电容 C_{ac} 供给的电流；

（2）非故障相 B 通过 B、C 相间的电容 C_{bc} 供给的电流；

（3）继续运行的两相中，由于流过负荷电流 $\dot{I}_{La}$ 和 $\dot{I}_{Lb}$，而在 C 相中产生互感电动势 $\dot{E}_{M}$，此电动势通过故障点和该相对地电容 C_0 而产生的电流。

这些电流的总和称为潜供电流。由于潜供电流的影响，将使短路时弧光通道的去游离受到严重阻碍，而自动重合闸只有在故障点电弧熄灭且绝缘强度恢复以后才有可能成功，因此，单相重合闸的时间还必须考虑潜供电流的影响。一般来说，线路的电压越高，线路越长，健全相对断开相的耦合作用越明显，则潜供电流就越大。潜供电流的持续时间不仅与其大小有关，而且也与故障电流的大小、故障切除的时间、弧光的长度以及故障点的风速等因素有关。因此，为了正确地整定单相重合闸的时间，国内外许多电力系统都是由实测来确定灭弧时间，该时间比三相重合闸的时间要长得多。如我国某电力系统中，在 220kV 的线路上，根据实测确定保证单相重合闸期间的熄弧时间应在 0.6s 以上。

由上可知，潜供电流的大小直接决定瞬时性故障故障电弧的熄灭速度。为了加速故障电弧的熄灭速度，国内通常在线路侧并联电抗器电器的中性点接入高补偿度的小电抗器以补偿健全相对断开相的电容耦合电流；国外如日本通常在线路侧采用一个高速接地开关，在线路两侧断路器跳闸后，快速接地开关短时接通，快速释放故障点电弧能量，达到快速灭弧的目的。

3．对单相重合闸的评价

采用单相重合闸的主要优点是：

（1）能在绝大多数的故障情况下保证对用户的连续供电，从而提高供电的可靠性；当由单侧电源单回路向重要负荷供电时，对保证不间断供电更有显著的优越性；

（2）在双侧电源的联络线上采用单相重合闸，可以在故障时大大加强两个系统之间的联系，从而提高系统并列运行的动态稳定性。对于联系比较薄弱的系统，当三相切除并继之以三相重合闸而很难再恢复同步时，采用单相重合闸就能避免两系统解列。

采用单相重合闸的缺点是：

（1）需要有按相操作的断路器；

（2）需要专门的选相元件与继电器保护相配合，再考虑一些特殊要求后，导致重合闸回路接线较为复杂；

（3）在单相重合闸过程中，由于非全相运行能引起本线路和电网中其他线路的保护误动作，因此，就需要根据实际情况采取措施予以防止。这将使保护的接线、整定计算和调试工作复杂化。

由于单相重合闸具有以上特点，并在实践中证明了它的优越性，因此，已在 220～500kV 的线路上获得了广泛的应用。对于 110kV 的电力网，一般不推荐这种重合闸方式，只在由单侧电源向重要负荷供电的某些线路及根据系统运行需要装设单相重合闸的某些重要线路上才考虑使用。

5.8　综合重合闸简介

在采用单相重合闸以后，如果发生各种相间故障时仍然需要切除三相，然后再进行三相重合闸，如重合不成功则再次断开三相而不再进行重合。因此，实际上实现单相重合闸时，也总是把实现三相重合闸的问题结合在一起考虑，故称它为“综合重合闸”。在综合重合闸的接线中，经过转换开关的切换功能能实现综合重合闸、单相重合闸、三相重合闸以及停用重合闸 4 种运行方式。

在综合重合闸中，除了选相元件以外，还增加了故障类型判别元件。其作用是判断是接地故障还是不接地的相间短路。通常采用零序电流和零序电压作为故障类型判别元件。在发生单相接地短路时，故障类型判别元件动作，解除相间故障三相跳闸回路，由选相元件选出故障相别跳单相；当发生相间接地故障时，故障类型判别动作判为相间故障，同时故障相的选相元件均动作，则由逻辑回路跳三相；而发生相间故障时，故障类型判别元件不动作，保护通过三相跳闸回路跳开三相断路器。

实现综合重合闸回路接线时，应考虑的一些基本原则如下：

（1）单相接地短路时跳开单相，然后进行单相重合，如重合不成功则跳开三相而不再进行重合。

（2）各种相间短路时跳开三相，然后进行三相重合。如重合不成功，仍跳开三相，而不再进行重合。

（3）当选相元件拒绝动作时，应能跳开三相并进行三相重合。

（4）对于非全相运行中可能误动作的保护，应进行可靠的闭锁，对于在单相接地时可能误动作的相间保护（如距离保护），应有防止单相接地误跳三相的措施。

（5）当一相跳开后重合闸拒绝动作时，为防止线路长期出现非全相运行，应将其他两相自动断开。

（6）任两相的分相跳闸继电器动作后，应联跳第三相，使三相断路器均跳闸。

（7）无论单相或三相重合闸，在重合不成功之后，均应考虑能加速切除三相，即实现重合闸后加速。

（8）在非全相运行过程中，如又发生另一相或两相的故障，保护应能有选择性地予以切除，上述故障如发生在单相重合闸的脉冲发出以前，则在故障切除后能进行三相重合。如发生在重合闸脉冲发出以后，则切除三相不再进行重合。

（9）对用气压或液压传动的断路器，当气压或液压低至不允许实行重合闸时，应将重合闸回路自动闭锁，但如果在重合闸过程中下降到低于允许值时，则应保证重合闸动作的完成。

5.9　750kV 及以上超高压输电线路重合闸的应用

750kV 及以上的特高压交流输电线是我国未来电力系统的骨干线路，是国家的经济命脉。由于其输送容量大，输电距离长，为保证其可靠连续运行，自动重合闸是不可缺少的。但是与 500kV 及以下的超高压输电线不同，由于其分布电容大，在拉/合闸操作、故障和重合闸时都将引起严重的过电压。因此，对于特高压输电线路，设计、应用、整定自动重合闸时首先要研究解决重合闸引起的过电压问题，现分别按三相重合闸和单相重合闸分述如下。

5.9.1 三相重合闸在超高压输电线路上的应用问题

特高压线路由于相间距离大，发生相间故障的概率很低，其故障以单相瞬时性故障为主要形式，各种故障发生概率的典型数据如下：单相接地故障 93%，两相故障 4%，两相接地

故障 2%，三相故障为 1%。据俄罗斯电力部门的实际运行统计资料表明：750kV 和 1150kV 线路 98%以上为单相故障。所以对于特高压电网来说，采用单相重合闸技术有利于其在瞬时性故障时快速恢复供电，对保证整个系统的安全稳定运行更为重要。故在特高压输电线上首先考虑采用单相重合闸。但在相间短路时必须实行三相跳闸和三相自动重合。在单相非永久性故障而单相重合闸不成功时（例如其他两非故障相的耦合使潜供电流难以消失时），也可再次进行三相跳闸、三相重合。故三相自动重合闸在特高压输电线路上也必须设置。

在特高压输电线路从一端计划性空投时会产生很高的过电压，但因为是计划性操作，在投入之前可采取一系列限制过电压的措施以保证过电压不会超过允许值和允许时间。在故障后三相自动重合时情况将完全不同。在因故障两端三相跳闸时，线路上的大量残余电荷将通过并联电抗器和线路电感释放，因而产生非额定工频频率的谐振电压，三相的这种电压也不一定对称，如果从一端首先三相重合闸时，正好是母线工频电压与此自由谐振电压极性相反，将造成很高的不能允许的重合过电压，不但要使绝缘子和断路器等设备损坏，而且重合也难以成功。故必须采取有效措施（例如采用合闸电阻等）和正确整定重合闸的时间来降低过电压。

研究表明，在从一端首先实行三相重合时，要引起重合过电压，对端重合的时间应在此重合闸过电压衰减到一定值时再合。首合端引起的重合过电压约在 0.2s 左右衰减到允许值，因此，后合一端的重合闸时间应该计及对端重合过电压的衰减时间，并考虑到断路器不同期动作等因素，使两端三相重合时间相差应约在 0.2~0.3s 左右。

5.9.2 单相重合闸在特高压输电线路上的应用问题

如上所述，在特高压输电线上三相重合闸如果不采取有效措施和合理整定将引起破坏性的重合过电压，因此，在特高压输电线路上一般都优先考虑单相自动重合闸。然而，研究工作表明，单相故障单相从两端切除后，断开相上的残余电荷释放产生的自由振荡电压和其他两非故障相对断开相的电容耦合的工频电压将产生一拍频过电压。如果先合断路器一侧的母线工频电压正好与此拍频电压极性相反，将会产生危险的过电压，尤其是当母线电压的正峰值遇到拍频电压的负峰值时更是危险，不但单相重合不能成功，还可能使绝缘子和设备损坏。因此，应该在断路器两触点之间的电压最小时合闸，至少应在拍频电压包络线电压最小时合闸，亦即应监视断开相电压，以确定合闸的时间。这种自适应合闸时间的重合闸和判断永久性故障和瞬时故障的自适应单相重合闸同样重要。研究结合这两种功能于一身的自适应单相自动重合闸对于特高压输电线路的自动重合闸的应用具有重要意义。

由南瑞继保电气公司生产的微机型综合自动化系统如图 6.16 所示。



图 5.16 微机型变电站综合自动化系统

【本章小结】本章讲述了自动重合闸在电力系统中的作用及实现的基本要求，同时对于在电力系统中应用最广泛地具有同步检定和无压检定重合闸方式的工作原理以及其中的特殊问题进行了讨论。对重合闸动作时限的选择原则、重合闸与保护的配合方式及 750kV 系统重合闸的应用也予以介绍。

【关键词】 自动重合闸 Autoreclosure ； 检同期 Synchronisation Check；综合重合闸 Compromise Poles Autoreclosure

【阅读材料】

自适应单相重合闸的研究现状及发展趋势

目前，由于电网运行电压的提高，特高压系统中过电压与绝缘成为突出问题，尤其是重合过电压更是成为特高压电网绝缘水平的决定性因素，对重合闸操作也提出新的要求，自适应重合闸在特高压线路上的有效应用显得格外重要；同时为了限制工频过电压，超高压、特高压输电线路通常在线路的送端和受端装设并联电抗补偿，为了提高超高压、特高压远距离输电线路的输电能力和系统稳定性，且对输电通道上的潮流分布具有一定的调节作用，需采用串联电容补偿技术。为此针对目前超、特高压长距离线路的特殊性，在研究单相自适应重合闸的同时，需要考虑到线路上并联电抗器及串联补偿电容的影响。

传统的继电保护是基于工频量的保护，新一代的继电保护是暂态保护，即基于检测故障所产生的高频暂态量的输电线路保护，它是利用故障产生的高频分量来实现的。故障时频率分量丰富的高频信号含有丰富的故障信息，高频分量的产生与线路参数、故障情况等有关，而与系统运行状况、过渡电阻等无关，因此，基于暂态量的保护不受工频现象如系统振荡、过渡电阻等的影响，高频分量的检测和识别较工频分量需要快得多的速度，因而基于暂态量的保护具有快速的特点。充分提取故障时的高频暂态量信息，可以获得更多的故障信息，以便在实现保护动能之外，实现故障测距、选相、自动重合闸等功能。

在自适应重合闸研究中不仅可利用暂态保护提取的故障高频暂态信息，通过比较各条线路的暂态电流谱能量实现对方向的识别，也利用小波、数学形态学的方法提取高频暂态分量，并对该信号进行能量谱分析，当区内发生故障时，在一个时间段内能量差别不大。当区外发生故障时，由于母线杂散电容以及结合电容的影响而大量衰减，因此，可通过比较高低频的能量谱对区内外故障做出判断。对于单相自适应重合闸的研究，因为瞬时故障与永久故障情况下，高频暂态信号也呈现很大的差异，将上述提取暂态信号并进行谱能量分析的方案，应用于故障类型的识别也是一个很好的借鉴。

在电力系统中，系统故障通常反应为电压、电流信号的突变，但信号的突变往往不太明显，为了把不太明显的的暂态突变特征更加明显的表现出来，常采用傅里叶变换和小波变换对突变量进行积分处理，但是不足之处在于需要保证足够宽度的采集数据窗口，且积分变化结果对于输入信号会带来相移和幅值衰减。数学形态学作为一种非线性的分析方法，且对信号特征的提取完全在时域中进行，信号相位移和幅值特性不会变化。数学形态学方法用于信号处理时只取决于待处理信号的局部形状特征，比传统的线性滤波更为有效，在有效的消除信号噪声的同时保留原信号的全局和局部特征。它计算简单，其算法只有加减法和取极值计算，不涉及乘除法，因而可以对信号进行实时处理。因此，在单相自适应重合闸中，数学形态的分析方法也有一定的应用前景。

故障过程中的电弧现象包含了很多丰富的暂态信息，国外专家对基于电弧电压特性的自适应重合闸的研究已经有了很大的成果，但在国内这方面的研究还为数不多。由于电弧变化

的复杂性，以及持续时间相对短暂，对它的研究存在很多难点，主要表现为一次电弧持续时间非常短，而且由于在故障初瞬间，系统中含有大量复杂的暂态信号，相比之下，电弧信号十分微弱，这样就使得在一次电弧阶段，电弧本身固有的一些特性不易在此时的线路电压中体现；与此同时，电弧重燃电压的不断变化以及电弧熄灭时刻的确定成为二次电弧研究的难点之一。因此，故障中出现的电弧，还有很大的研究潜力。

资料来源： 电力系统保护与控制，程玲等

习 题

5.1 判断题

1. 不管任何原因使断路器断开，自动重合闸装置都将动作使断路器合上。 （ ）

2. 对于仅使用三相重合闸的线路而言，潜供电流是不存在的。 （ ）

3. 当线路发生故障时，第一次都是由保护瞬时动作予以切除，重合以后保护第二次动作切除故障是有选择性的，这种方式称为自动重合闸后加速保护。 （ ）

4. 单相重合闸过程中将产生负序分量和零序分量。 （ ）

5. 330kV～500kV 线路一般情况下应装设三相重合闸装置。 （ ）

6. 断路器合闸后加速与重合闸后加速共用一个加速继电器。 （ ）

7. 对于双侧电源系统，当线路上发生故障跳闸以后，重合闸时还要考虑两侧电源是否同步以及是否允许非同步合闸的问题。 （ ）

8. 断路器手动合闸于故障，而随即被继电保护跳开时，自动重合闸装置也应动作。（ ）

9. 当重合于永久性故障时，对超高压系统可能引起系统振荡。 （ ）

10. 综合重合闸兼具单相重合闸和三相重合闸的功能。 （ ）

5.2 问答题

1. 重合闸装置对电力系统有什么不利影响？

2. 怎样考虑重合闸动作时限的选择原则？

3. 何谓重合闸前加速保护，它有哪些优缺点？

4. 何谓重合闸后加速保护，它有哪些优缺点？

5. 单相重合闸中选相元件的作用和类型是什么？目前常用的是哪一种？

6. 为什么在综合重合闸中需要设置故障判别元件?常用的故障判别元件有哪些?对它们有什么基本要求?